

# Las razones Geológicas de la Minería del Cobre

Luis de la Torre  
José Antonio Espí

# Las razones Geológicas de la Minería del Cobre

## ÍNDICE:

- Introducción
- Panorámica del cobre
- Escasez mineral
- La importancia de los costes
- El inexorable decaimiento en leyes
- La naturaleza y los modelos de depósitos minerales disponibles
- Los proyectos y sus indicadores
- El cobre y su futuro próximo
- Conclusiones

# Introducción. La economía mineral y su relación con la naturaleza.

- .....”Si la sociedad actual fuera sensible acerca de los temas de escasez mineral, invirtiendo recursos para aumentar la información geológica a fin de determinar mejor la forma de la curva de suministros acumulados, ello podría proporcionar muchos datos de las circunstancias de una posible reducción de los recursos a largo plazo”.

*John E. Tilton. “Mining, Minerals and Sustainable Development”. 2001*

# Introducción. La economía mineral y su relación con la naturaleza.

- “Algunos estudiosos ven los precios de la materias primas minerales estacionarios a largo plazo y concluyen que la escasez no será de momento ningún problema. Otros, sin embargo, concluyen que la relación de precios con el tiempo posee una forma de U y, por lo tanto, la escasez estaría en aumento a largo plazo.
- Pero,
  - 1º) Durante el pasado siglo y en periodos de explosión del consumo, no ha existido nunca problema alguno de **escasez**.
  - 2º) Del pasado se extrae que la tendencia en el **precio de los minerales** no es fija” .....

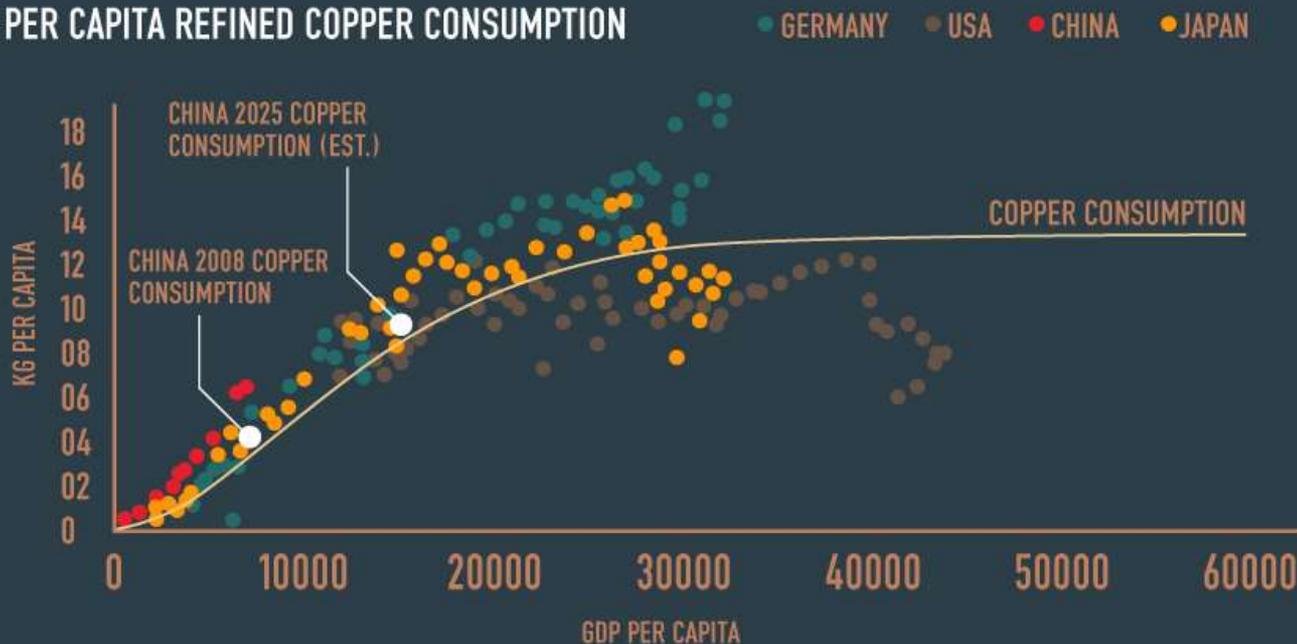


# Una panorámica del cobre

# La importancia del cobre

- **Tercer mineral** en producción mundial tras hierro y aluminio.
- Cotiza en **bolsa** LME, NYME, Shanghai con las principales MP (spot/fut.)
- Uno de los mejores **indicadores** de consumo de cobre per cápita es la renta per cápita (grado desarrollo país: su PIB y su consumo eléctrico).
- *El incremento del PIB o de la producción industrial conlleva un aumento en la demanda de metales y energía (más que de alimento). [World Bank]*

## PER CAPITA REFINED COPPER CONSUMPTION

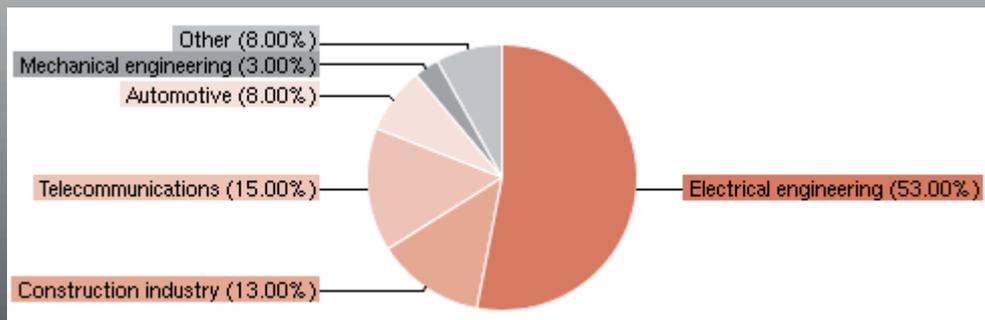


|             | Actual    | Commodity |         | Bonds |  |
|-------------|-----------|-----------|---------|-------|--|
|             |           | Chg       | %Chg    |       |  |
| Crude Oil   | 49.4768   | ▼ 0.3252  | -0.65 % |       |  |
| Brent       | 51.7508   | ▼ 0.46    | -0.88 % |       |  |
| Natural gas | 3.2044    | ▲ 0.0119  | 0.37 %  |       |  |
| Gasoline    | 1.6304    | ▼ 0.0108  | -0.66 % |       |  |
| Heating oil | 1.5491    | ▼ 0.0105  | -0.67 % |       |  |
| Gold        | 1262.5042 | ▼ 1.75    | -0.14 % |       |  |
| Silver      | 17.3265   | ▼ 0.007   | -0.04 % |       |  |
| Copper      | 2.5345    | ▼ 0.0312  | -1.22 % |       |  |
| Corn        | 370.6125  | ▼ 3.25    | -0.87 % |       |  |
| Soybeans    | 922.2417  | ▼ 2.25    | -0.24 % |       |  |
| Live Cattle | 122.5726  | ▼ 1.4     | -1.13 % |       |  |
| Wheat       | 434.1643  | ▼ 4.25    | -0.97 % |       |  |
| Cotton      | 77.30     | ▲ 0.21    | 0.27 %  |       |  |

[More](#)

# Aplicaciones principales del cobre

Propiedad conductora de calor y electricidad, ductilidad, maleabilidad, resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas (aleaciones).



## 1 TONNE OF COPPER IS NEEDED FOR

**2,000,000,000**  
Computer chips



**300,000**  
Digital cameras



**250,000**  
Smart phones and tablets



**3,000**  
Electrical & electronic equipment (PCs, laptops)



**2,000**  
Antimicrobial door handles



**1** Industrial transformer



**10** Large industrial motors



**50** Heating Systems



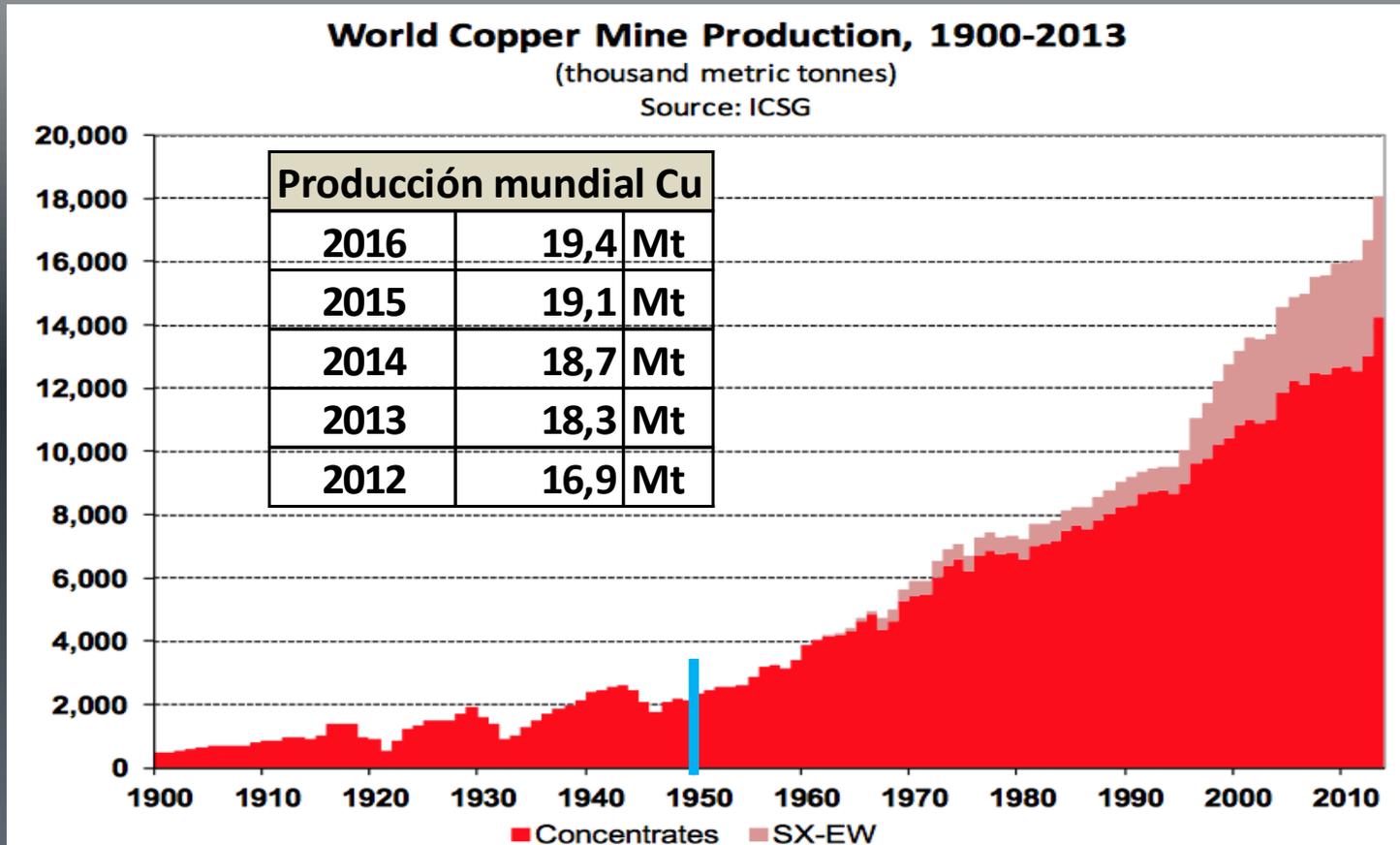
**125** Air-conditioning units



**1,000**  
White goods

# Fuerte incremento en la producción del cobre

- Si en 2005 Chile tenía el 35% de la producción global del metal, en 2015 bajó a 30%. En esos 10 años Chile subió 8%, mientras la de Perú creció 37%, la de China 114%, la de Zambia 72% y la del Congo, un 956%.

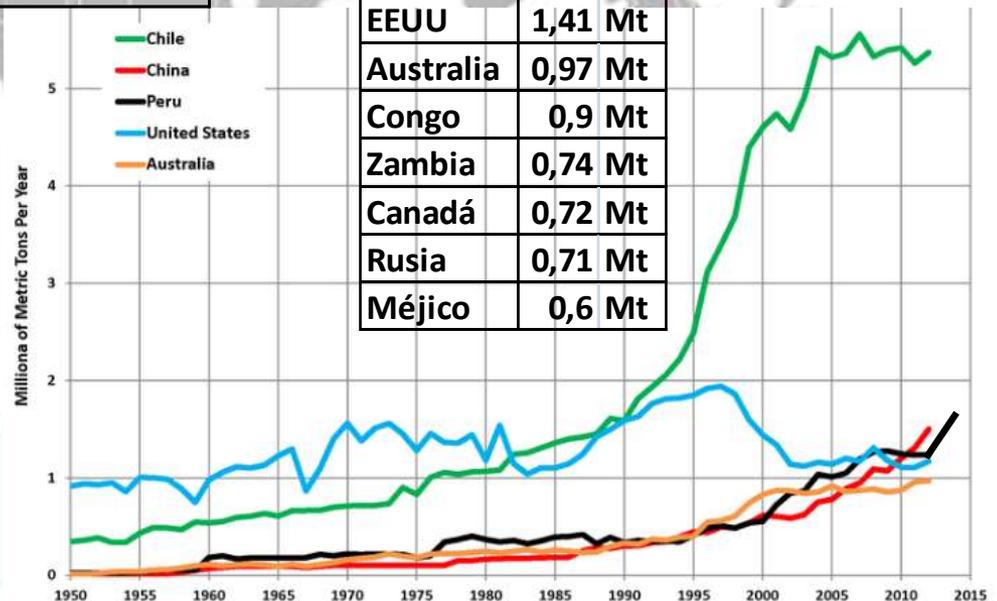
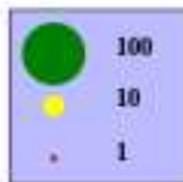


# Producción y reservas de cobre

| Principales Minas de Cobre 2016 |                   |             |               |
|---------------------------------|-------------------|-------------|---------------|
| Chile                           | BHP               | Escondida   | 1.148 x1000 t |
| EEUU                            | Freeport          | Morenci     | 485 x1000 t   |
| Chile                           | Codelco           | El Teniente | 470 x1000 t   |
| Chile                           | Anglo A, Glencore | Collahuasi  | 455 x1000 t   |
| Chile                           | Anglo American    | Los Bronces | 400 x1000 t   |

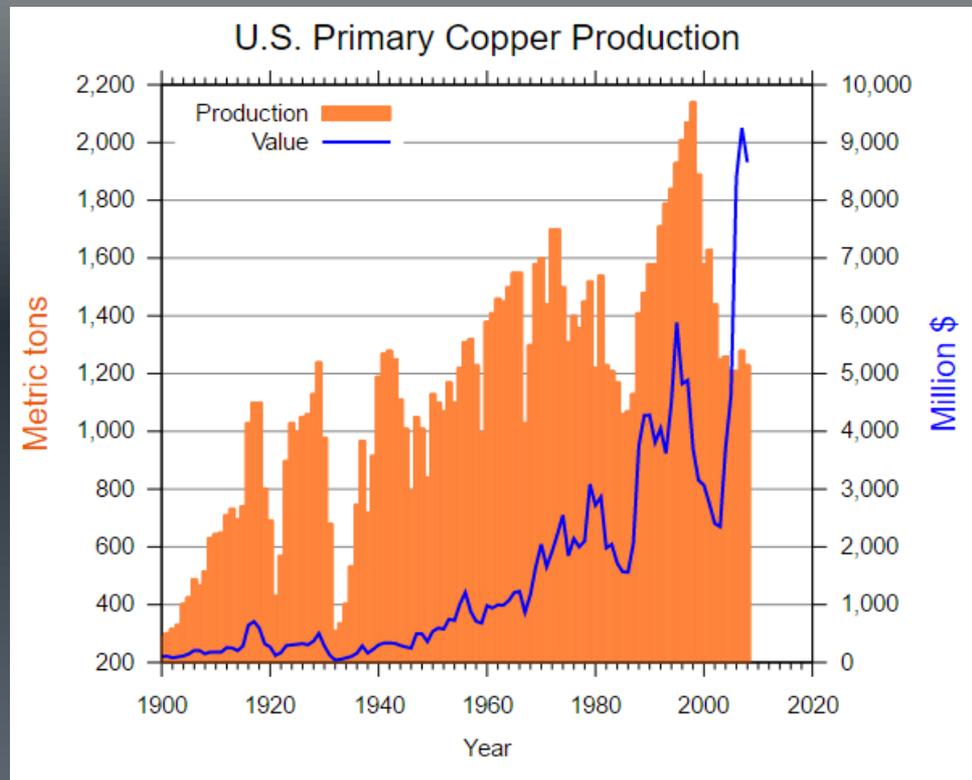
| Producción 2016 |         |
|-----------------|---------|
| Chile           | 5,5 Mt  |
| Perú            | 2,3 Mt  |
| China           | 1,74 Mt |
| EEUU            | 1,41 Mt |
| Australia       | 0,97 Mt |
| Congo           | 0,9 Mt  |
| Zambia          | 0,74 Mt |
| Canadá          | 0,72 Mt |
| Rusia           | 0,71 Mt |
| Méjico          | 0,6 Mt  |

| Reservas mundiales de Cu |        |
|--------------------------|--------|
| 2011                     | 630 Mt |
| 2014                     | 700 Mt |
| 2015                     | 720 Mt |



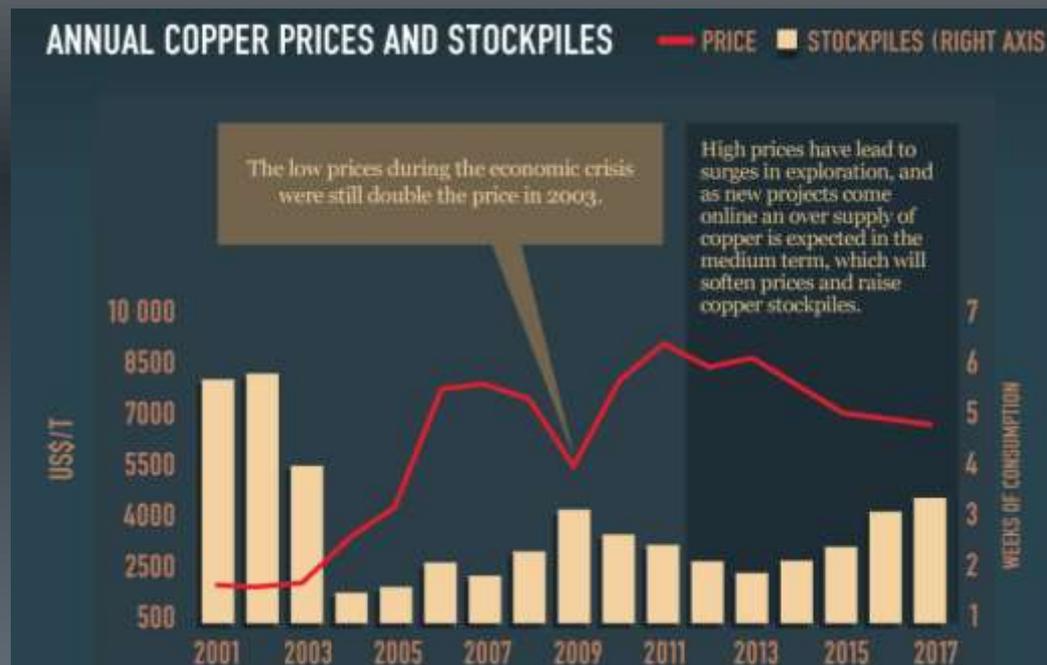
# Relación precios - producción

- El cobre suele reflejar los **ciclos económicos** = grandes fluctuaciones
- Las **variaciones en la demanda** elevan o disminuyen los precios, que a su vez incrementan o disminuyen la producción (con sus plazos por tiempos de maduración (mín. 1 año), inversiones en exploración y nuevas tecnologías)



# Relación de stocks con precio mineral

- Los **períodos de bajos precios** suponen **acumulación de stocks**, y cuando existe **acumulación de mineral en almacenes**, **baja el precio** en el mercado. Ley O/D.
- Recordemos: en economía Mayor precio = Escasez.
- **Altos precios** provocan inversión en exploración, que con la llegada de nuevas explotaciones ven aumentado el suministro de cobre, lo que suaviza los precios y llena de nuevo los almacenes.



# Precios del metal en mercado

- Son un output, no un input, marcados por la oferta y la demanda.
- **Motivación:**
  - Cash cost: de la mano con los precios (sube el precio, sube cash cost)
  - Disminución leyes y aumento de costes (excepción 2015-2016)
  - Nivel de competencia en costes
  - Ocurrencia de incidentes sociales (huelga Escondida)
  - Desfase variación stocks ante crecimientos bruscos económicos, dejando el precio en manos de los productores (excepción temporal). Tras IIGM el poder cambia de manos del minero, al comprador.
  - Desfase variación demanda vs. inicio producción mina (período maduración)
  - Especulación
  - Desconocimiento de la naturaleza (tipologías minerales)
  - Comunicaciones previendo escasez, desaparición yacimientos “prime”
  - Aparición sustitutos (Al, F.O., plásticos), nuevos usos (vehíc. eléctrico, EERR)
  - Crisis económicas (doble ciclo económico y mineral)

# Evolución demanda de cobre (I)

- Tras 5 años de estabilidad (1.400-2.000 USD/t), llega 2003-2006 con fuertes subidas (4.500-8.778 USD/t) por desequilibrio O/D. A finales 2006 bajan precios al moderarse la demanda y recuperarse la producción.
- Razón de fondo:** variación demanda países emergentes (China 25% consumo 2006 y un 47% consumo metales en 2014).



# Evolución demanda de cobre (II)

- La crisis financiera mundial de 2008 arrastra al consumo y los precios, remontando desde 2009 ante una economía china ávida de infraestructuras, hasta 2013 cuando vuelve a caer ante el cambio de modelo chino y la ralentización en su crecimiento.
- Desde junio 2016 aparece un repunte propiciado ante las políticas de infraestructuras en los EE.UU. (¿Afectará la salida de la COP21?)





# La escasez mineral

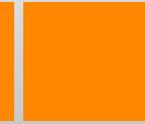
# Teorías de la escasez mineral



## Enfoque Stock Fijo <> Stock Variable

- El enfoque pesimista del Stock Fijo considera unas reservas fijas y una demanda creciente: **vida de las reservas** = reservas conocidas/consumo.
- Pero... se deben **considerar la exploración y las nuevas tecnologías** (fondo marino con acceso a 700 Mt, mayor profundidad minas, nuevos procesos metalúrgicos SX/EW), **el reciclaje, los sustitutos...**
- **Poco útil** para evaluar la escasez futura, ya que gran parte del cobre que contiene presumiblemente nunca será rentable para ser explotado.
- Las reservas medidas en términos de producción anual han variado **considerablemente de 26 a 61 años.**

# Teorías escasez mineral



Enfoque más empleado: **paradigma del coste-oportunidad**

- ¿Qué debe la sociedad abandonar para obtener otra tonelada de cobre?
- Considerar más que un agotamiento físico, un **agotamiento económico y gradual** que alcanzaría un punto donde el coste de producir ese metal no resultara asumible. **En economía se considera un aumento en la escasez de un bien, cuando sube el precio del mismo en el mercado.**
- Existe una **carrera** entre el aumento de coste de extracción (por menores leyes, más remoto...) y los precios del metal , a contrarrestar con el abaratamiento ante nuevas tecnologías.
- **Existen incertidumbres** en la **demanda** (población), en la **oferta** (cantidad mineral explotable a lo largo del tiempo, en función de los diferentes precios), una **incompleta internalización de costes** (de difícil valoración para su consideración, con la *aproximación pesimista* de la restricción ante la cultura indígena, biodiversidad y otros bienes comunes).

# El “límite” en los recursos minerales

- ✓ 1. Límite medioambiental: **limitante**; nos movemos desde el entorno de "tres pilares" que deben conciliarse como de desarrollo sostenible: el progreso económico, la justicia social y la preservación del medio.
- ✓ 2. Límite mineral: en función de su génesis y posibilidad de formarse en yacimientos. Dependiendo de la forma en que se presente una especie mineral, y la tecnología existente, su obtención podrá ser más o menos rentable económicamente.

“*Vida de las reservas*” (reservas/consumo anual)  $\leftrightarrow$  *Disponibilidad Futura* (tipo de depósito mineral, su tamaño, los costos de extracción y procesado, nivel de las cotizaciones de los metales, la intensidad de la exploración y, por supuesto, el desarrollo de las tecnologías). **Sistema dinámico.**

- ✓ 3. Límite real: el mercado
  - La oferta futura vendrá marcada por el **precio del metal** y la **conciencia medioambiental**, pero dependiendo también de la producción según la disponibilidad de metales en la naturaleza, la dificultad y el coste de exploración, o las condiciones del país donde se explote.

# Estimaciones en la escasez del cobre

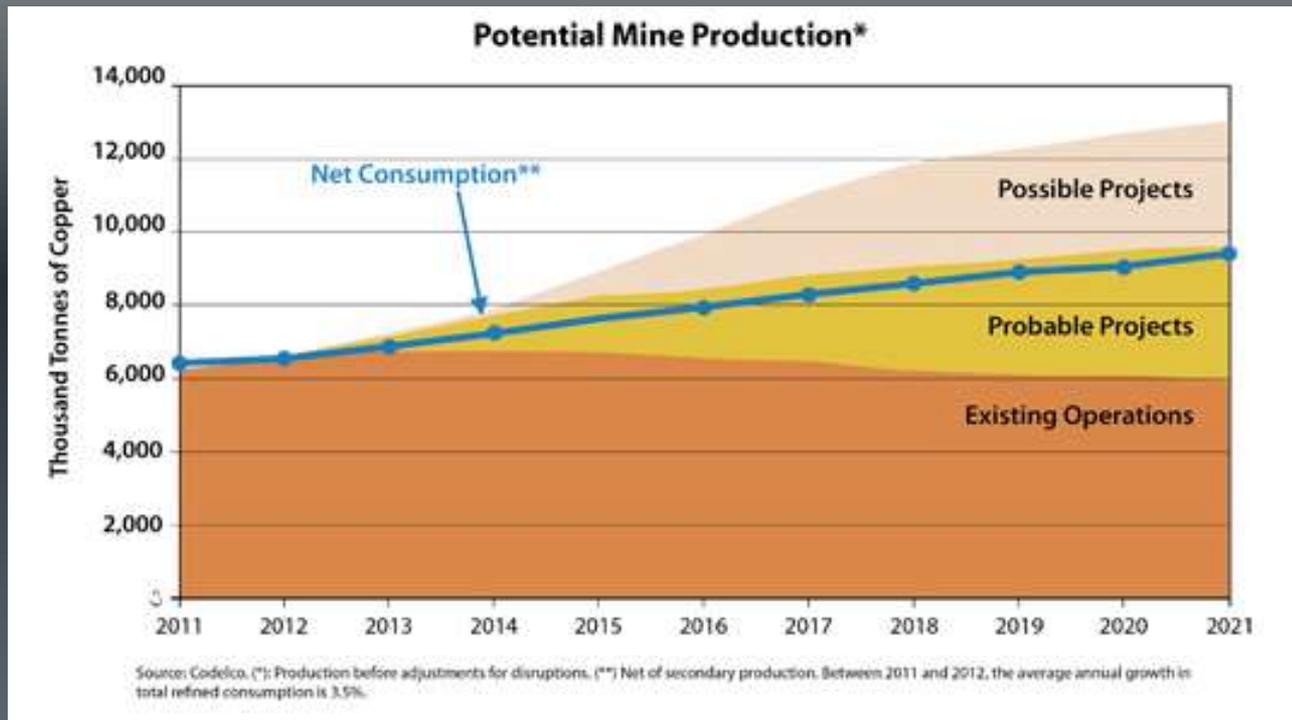
- **Northeya** : consideran que existen suficientes recursos de cobre identificados para mantener la producción minera de cobre por lo menos durante los próximos **veinte años**.
- **Kessler**: modelo espacio-tiempo aplicado a la situación geológica de los depósitos de cobre de tipo pórfido de manera vertical, con el fin de calcular la capacidad de la Tierra en depósitos minerales de cobre la futura minería. Podría abastecernos durante **5500 años**.
- **USGS**: recursos de cobre identificados: 2.100 millones de toneladas + 3.500 Mt de cobre no descubierto (11 regiones)>> consumo 20 Mt/a=**280 años**. Extrapolar información sobre depósitos conocidos en y cerca de la superficie, y en las partes menos exploradas y más profundas de la subsuperficie.
- **Gordon (2006), GBG**: la extracción acumulada de cobre ha estado creciendo más rápido que el descubrimiento de nuevos recursos, y las explotaciones acumuladas se acercan a los descubrimientos. La **escasez que se avecina** fomentará una transición de sustitución del cobre por otros más abundantes (Fe, Al).

# Opinión de Skinner

- Skinner se focaliza en los recursos “no descubiertos” y dice que en algunas partes del mundo los recursos minerales todavía no han sido explorados intensamente, ya que todavía existen sistemas políticos inestables, depósitos inaccesibles, o bien, por otras razones políticas y sociales.
- Sin embargo, existe otra razón más poderosa: muchos depósitos aun no descubiertos lo son por la cobertera de rocas jóvenes que impiden que los sistemas actuales puedan detectarlos. Resolver este reto requiere una acumulación de esfuerzos de índole político y tecnológico muy importante.
- También se posiciona en contra del modelo de Lasky que sugiere que la ley disminuye aritméticamente mientras el tonelaje de un depósito sube exponencialmente.

# Optimismo en el suministro del Cu

- La casuística habitual nos permite ser **optimistas**, de igual forma que hizo CODELCO en 2012, observándose en la gráfica cómo quedaría cubierto el incremento de consumo.



# Agotamiento mineral

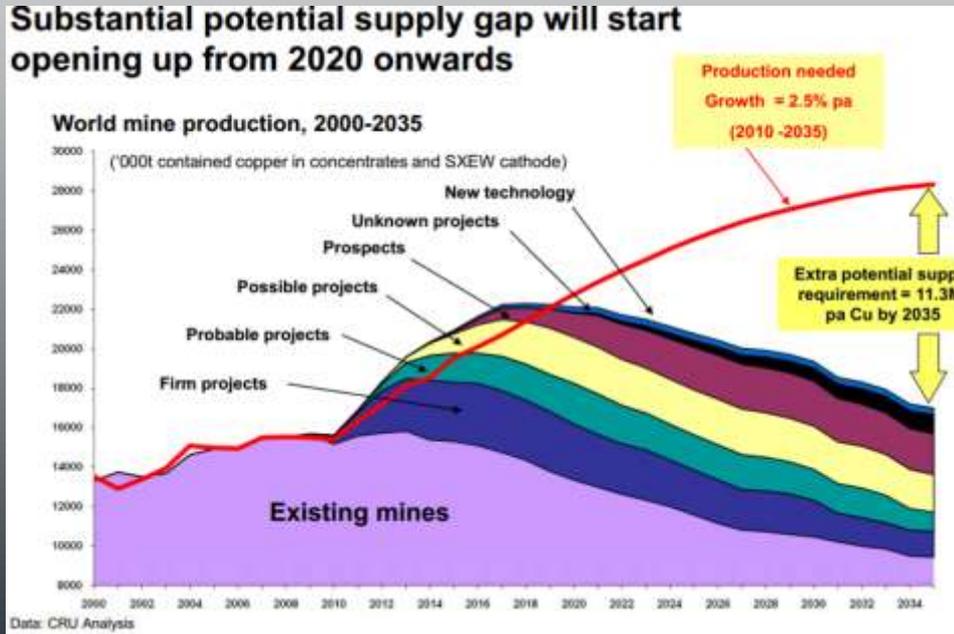
- El **agotamiento** del mineral de cobre se limitaría a ser una amenaza. Se aceptaría hablar de un agotamiento del **escenario** (económico, tecnológico, social) o de sus condiciones. **Menor acceso a alguna tipología**
- Es cierto el agotamiento de yacimientos en operación vs. descubrimientos nuevos adyacentes (brownfield/greenfield) y el incremento de costes por ubicación remota en busca de nuevos yacimientos, cierta disminución de ley, mayor movimiento de tierras, explotación subterránea, una metalurgia más compleja ...
- Escasez como peor situación (pérdida compensación O/D): algo temporal por mala gestión de stocks, una menor inversión en exploración o desarrollo tecnológico que repercute en el coste de la unidad de producción. Un 5% de sobreproducción produce pánico en el mercado.
- Disminución de stocks= aumento precio= exploración y nuevas tecnologías o sustitutos. Ej: “Peak Oil” (Hubbert, 1956): 40 años y además fracking
- Es el **mercado** quien decide el final de un mineral, aunque actualmente, una **sociedad consciente** decide cómo seguir explotando o cuándo abandonar: concepto de DESARROLLO SOSTENIBLE 

# Buscando la sostenibilidad

- La sociedad exigirá la sostenibilidad, en sus tres dimensiones:
  - Paridad económica: apropiada distribución de riesgos y beneficios (compañía minera, Gobierno y percepción comunidades afectadas).
  - Uso del suelo: competir con cultivos, parques nacionales, urbanización
  - Costes ambientales mineral extraído vs. reciclado (energía, agua y terreno).
  - Permisos de Evaluación de Impacto Ambiental (previo inicio proyecto).
  - Control de Impacto Ambiental durante la operación: vertidos, residuos, gestión del agua (uso y contaminación), GEIs.
  - Rehabilitación cierre de mina (aprobado en fase proyecto): su efectividad crítica para el impacto ambiental y social local.
  - Aumento de escala: mayor volumen por menores leyes, obliga a mayores movimientos, consumos, vertederos ...

El límite vendrá marcado por: **recursos-tecnología-medioambiente-social**

# La amenaza simple del agotamiento



¿¿¿ Se cumplirá  
la amenaza de  
la gráfica???

- ¿O serán realmente el mercado y sus precios quienes decidan sobre la aparición de esa “carencia” de mineral?
- El mercado facilita los recursos para invertir en exploración y tecnología, así como señala la escasez, sobreabundancia o riesgo de prohibición de algún producto, pero costrará fuerza el debate socio-ambiental, más que sobre la escasez (ej. el oro).



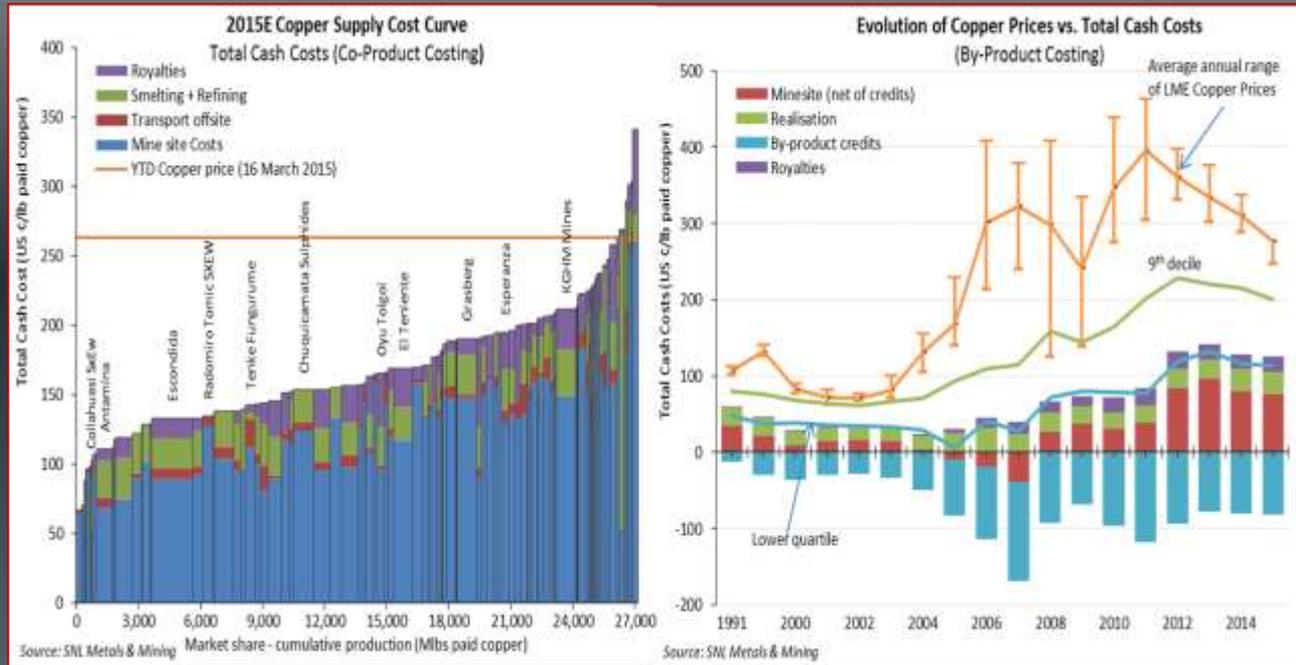
# La importancia de los costes

# Posición competitiva

- Una ley elevada o depósitos cercanos a la superficie, hoy resultan muy difíciles de conseguir, en especial los depósitos con una baja razón de desmonte que permitirían disponer de unos bajos costos de operación.
- Los depósitos más profundos requieren métodos de minería subterránea que, por lo general, significan mucho más altos costes de operación.
- Conseguir un proyecto dentro del percentil 50 de la curva de costes es cada vez más complicado, debido a que los yacimientos conocidos con leyes más altas son generalmente más profundos y los superficiales todavía no desarrollados poseen leyes muy bajas.

# Posición competitiva

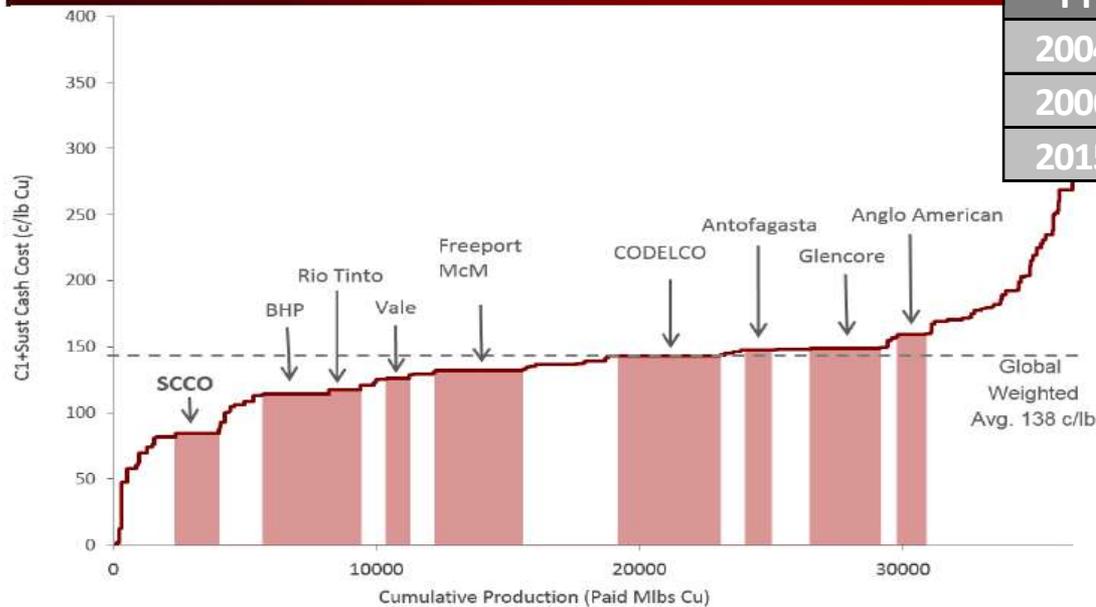
- Existirán muy pocos proyectos que superen los obstáculos de, al menos, un 15% TIR y, para la seguridad a largo plazo, que estén dentro del percentil 50 de la curva de costes, con la seguridad que esto supone ante bajadas de precio.



# Posición competitiva

Cash Cost = mining costs + processing costs – profit premium

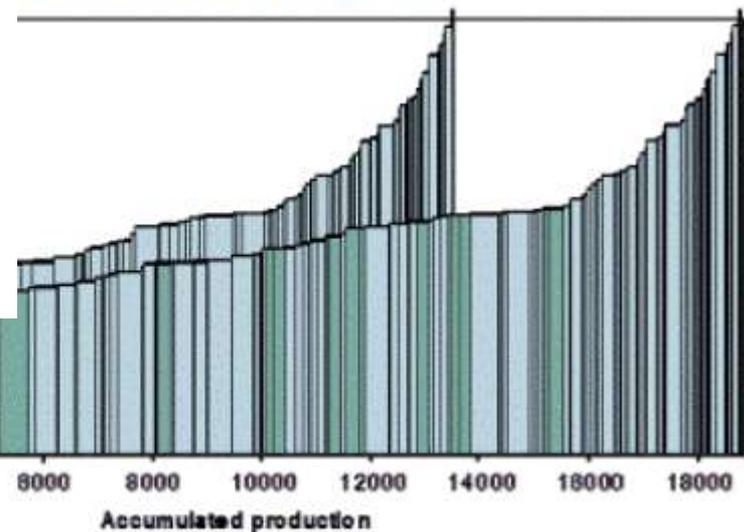
## 2015 Copper Production Cash Cost by Company



### Precios del cobre

|      |      |        |
|------|------|--------|
| 2004 | 1,3  | usd/lb |
| 2006 | 3,04 | usd/lb |
| 2015 | 2,49 | usd/lb |

### ash-cost curve, 2013 and 2018



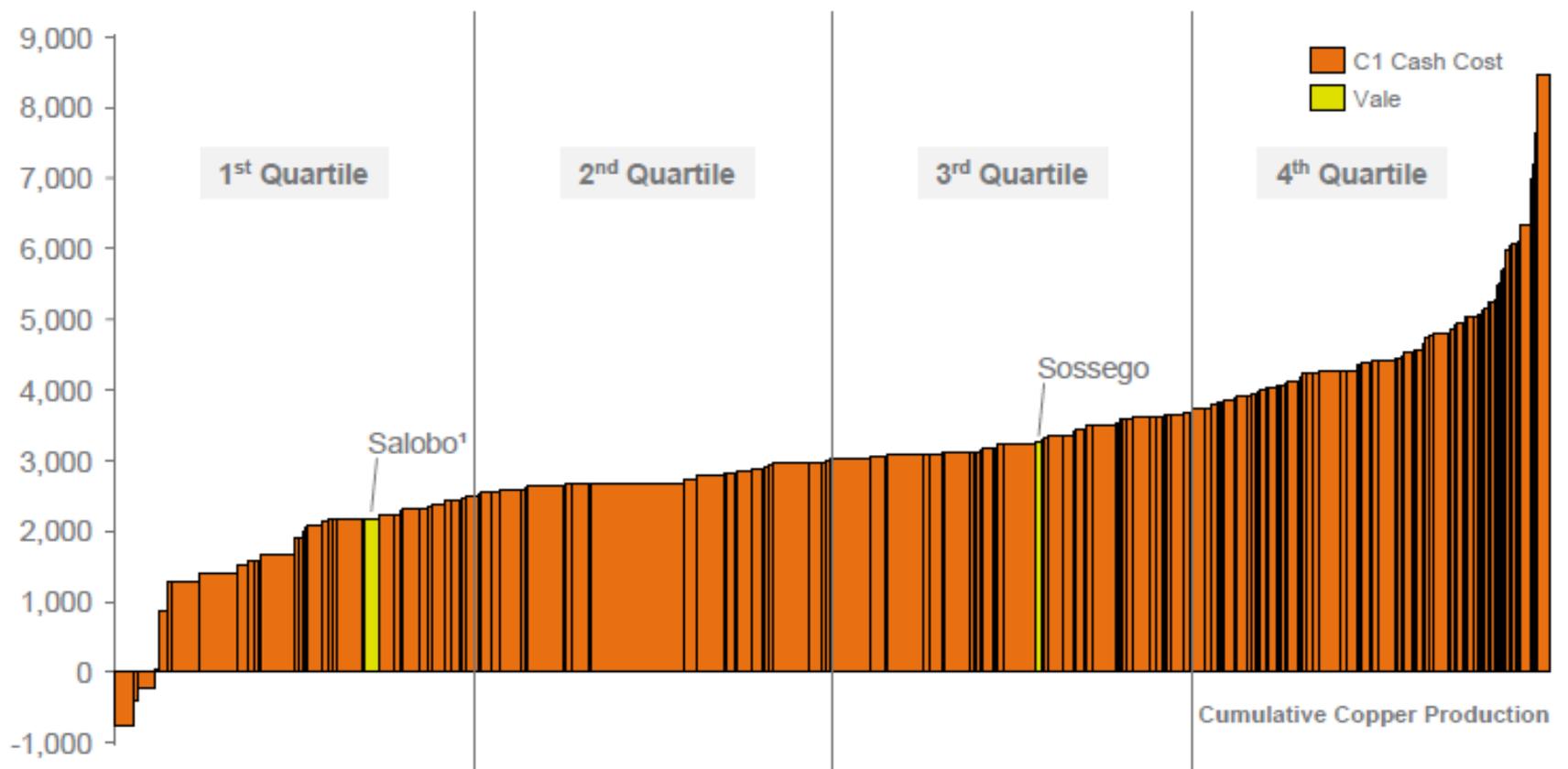
12

# Posición competitiva



- En cualquier caso, habrá un retraso considerable antes de que los proyectos que cumplan las condiciones anteriores estén listos para la producción, y este retraso resulta inevitable durante un tiempo, durante el cual, el suministro del metal se reducirá y la demanda aumentará gradualmente o incluso de manera drástica.
- Esto conducirá a la siguiente subida del precio del metal. Lo único que es incierto en este escenario, tal como la historia ha registrado en varias ocasiones, es cuándo va a suceder.
- Este mecanismo tiende a eliminar los proyectos con costes extremos superiores como consecuencia de las reducciones de precios cotizables, y contempla la eliminación de los proyectos de costes bajos por agotamiento acelerado o bien por sus reducidas dimensiones.

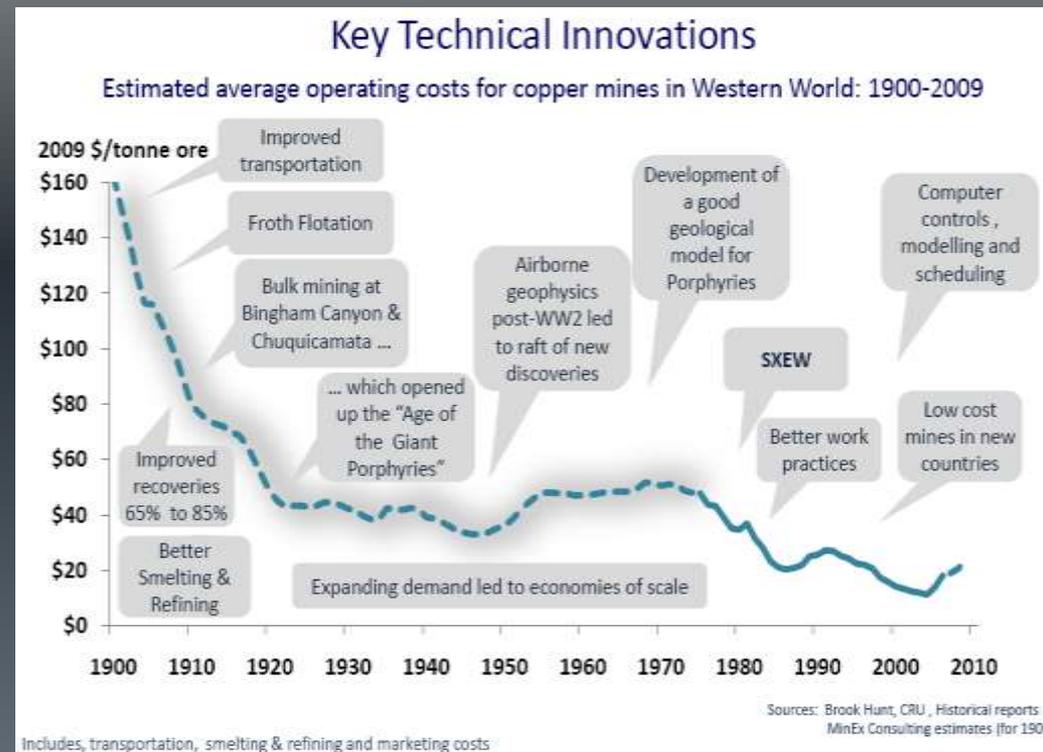
2015 Global Copper Industry C1 Cash Cost Curve, USD per ton of copper



# Mejoras en los costes

Logro de reducción en costes por:

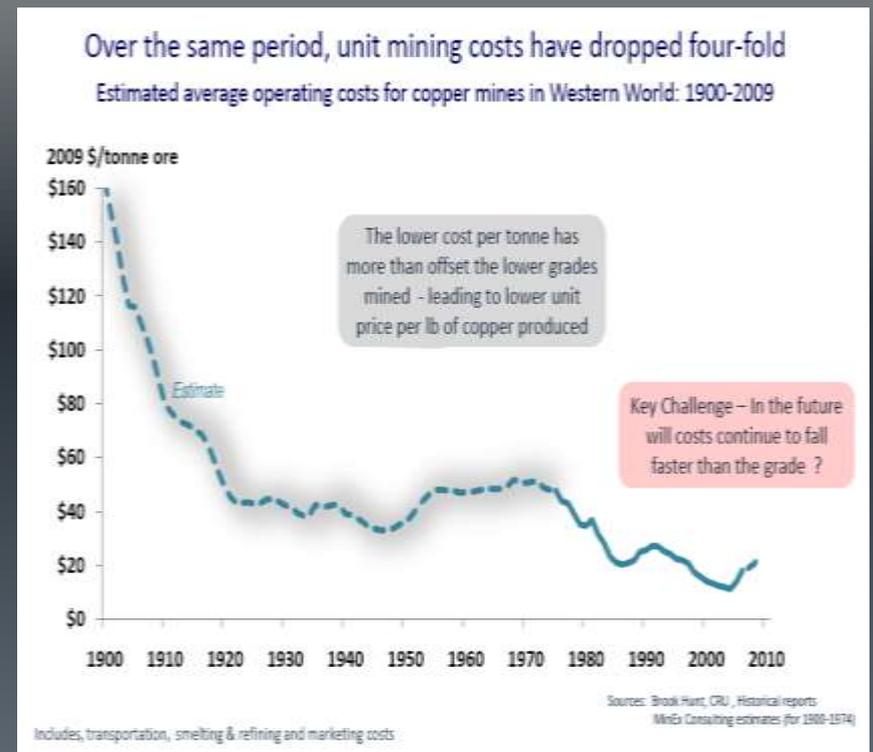
- Las nuevas tecnologías entre los años 1905-2007 se alcanza una reducción de costes del 70%.
- Las economías de escala en esos mismo años se estima una mejora del 30%.



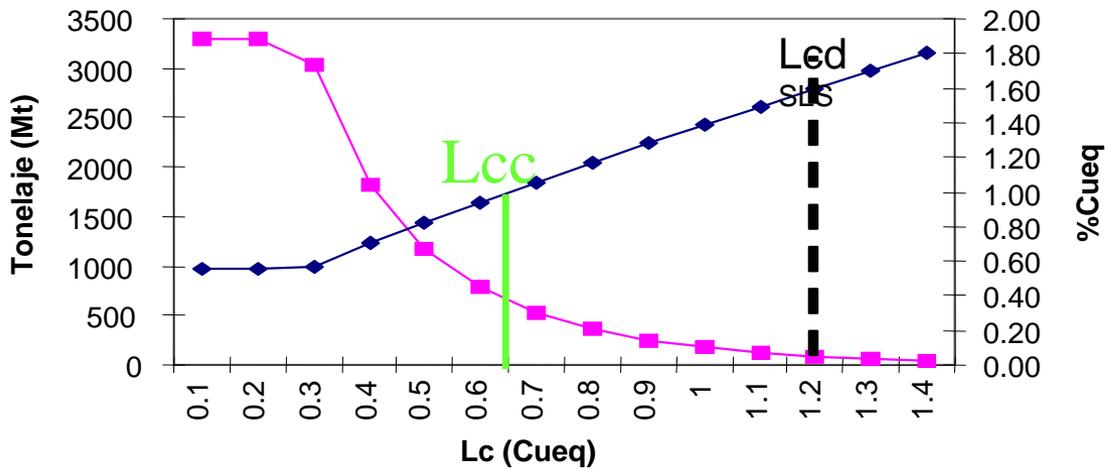
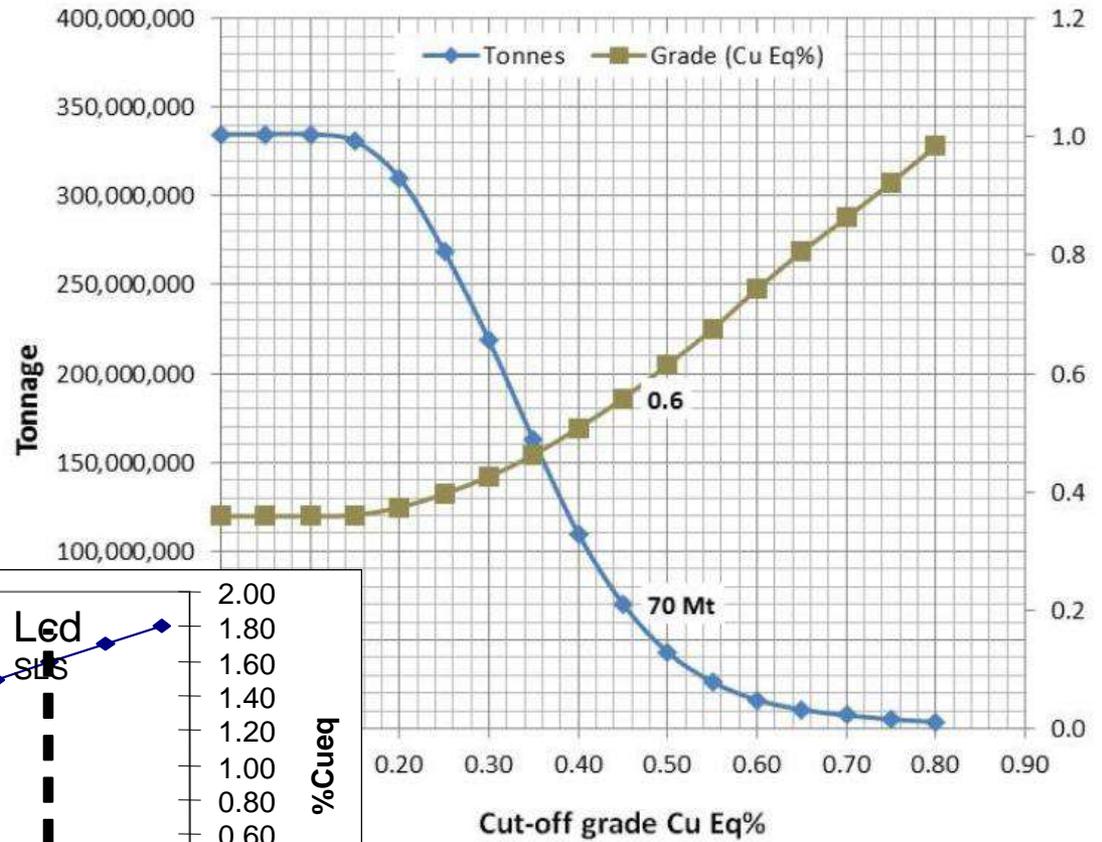
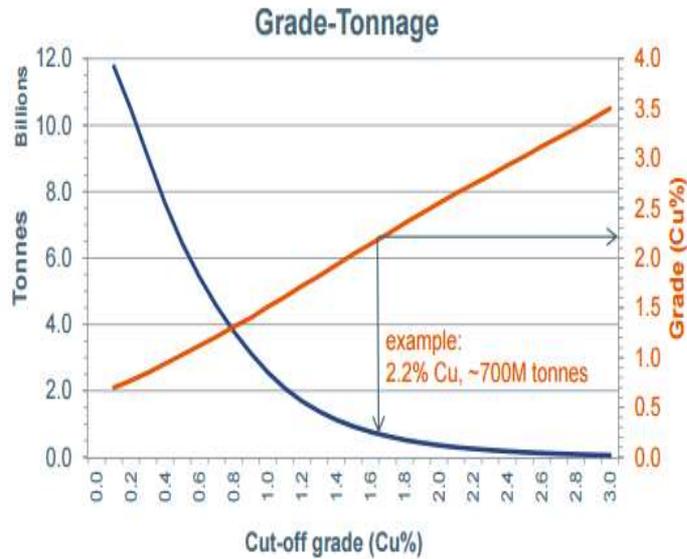
# Variaciones en los costes

- A igual producción, siempre las bajadas en ley implican mayores costes por mayor movimiento de tierra y tratamiento, mayor energía, necesitando del *gigantismo*, o considerando la *minería subterránea* tras mayores leyes.
- Sin embargo la experiencia actual en los costes de producción indica que los efectos en su reducción a causa de las nuevas tecnologías pueden más que su incremento debido al descenso en la calidad de los yacimientos.

En 2015-16, existe reducción de costes coincidiendo con bajadas precio energía, y políticas de ahorro ante la crisis (reducción costes contratas y dotaciones propias)



# Curvas ley-tonelaje



# Variación en las Reservas minerales

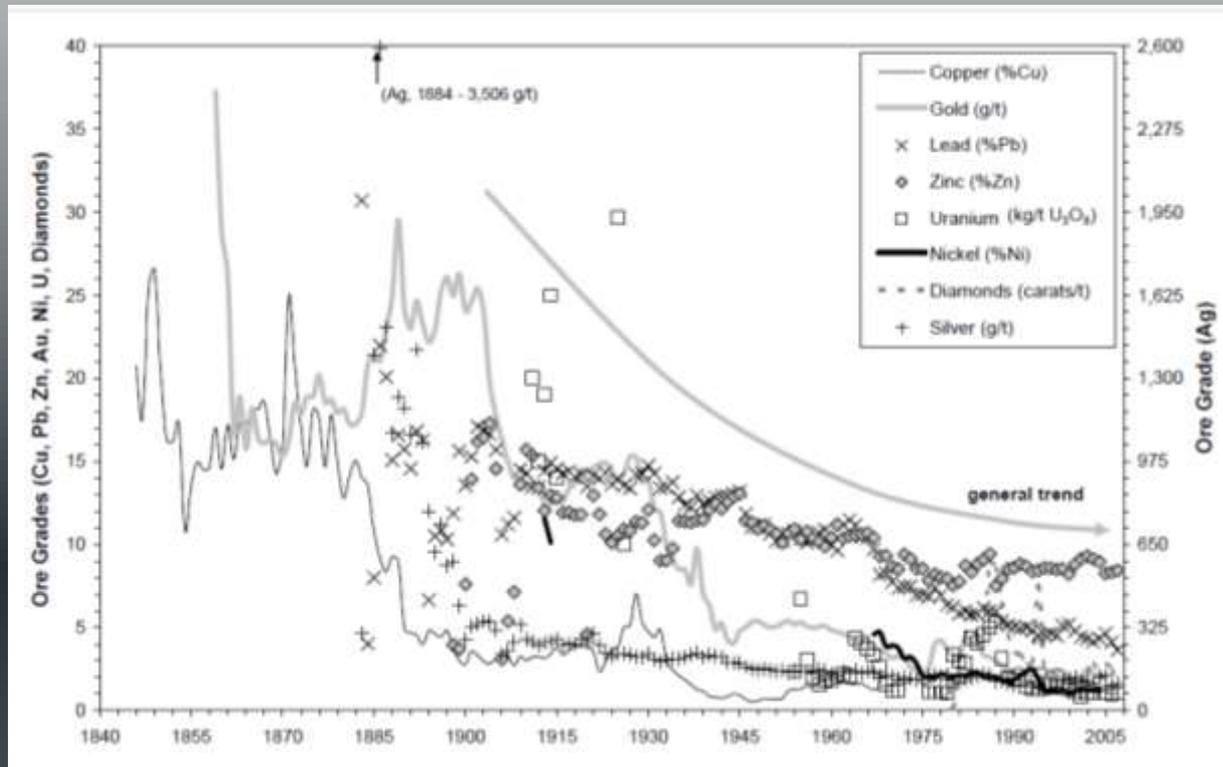
- En el último siglo el volumen reconocido de cobre creció 25 veces. Una razón del enorme crecimiento de los recursos reconocidos ha sido la reducción de las leyes de corte. Las leyes de mina han declinado en el transcurso del tiempo. Relación de la ley con el tonelaje.
- La vida de las reservas ha descendido suavemente en los últimos 60 años. A parte de los descubrimientos, influye:
- La Curva de Kuznets explica cómo la incorporación de países al desarrollo pesa en el consumo, momento tras el cual da lugar a la U invertida (Ej. España época de la construcción 400 Mt áridos, mientras que Alemania consumía 40 Mt).
- El concepto “decoupling”. En el siglo XX se incrementó el ingreso global per cápita x 7 y el consumo medio recursos sólo x 2





# **El decaimiento inexorable de las leyes minerales**

# ¿Aguantará la explotación con la disminución de las leyes?



Disminución en las leyes de diferentes minerales (cobre, oro, plomo, zinc, níquel) en Australia desde 1840.

# Decaimiento leyes de Cobre

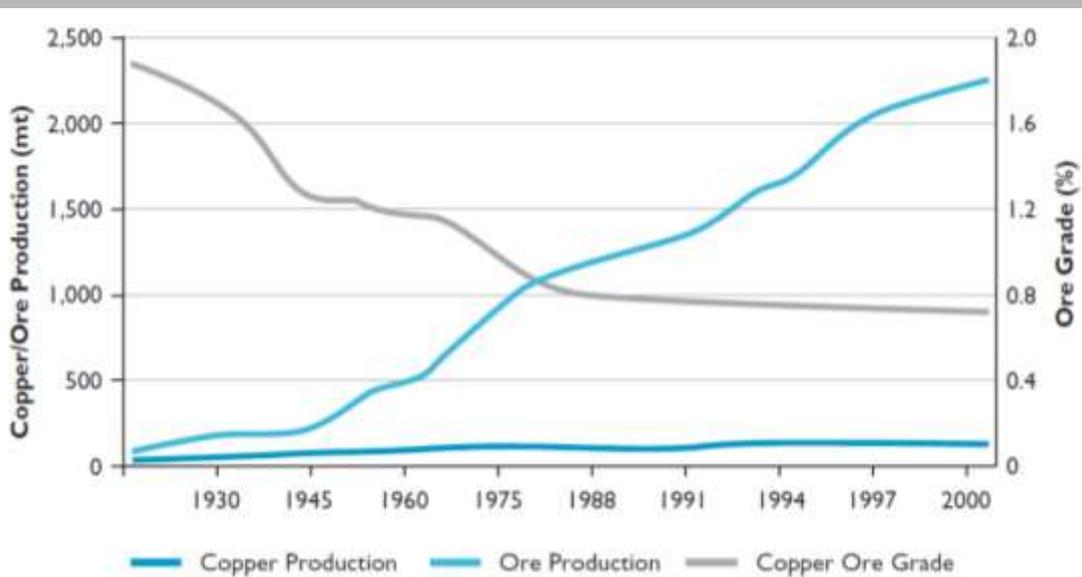
- Australia, en la mina Burra en 1945 se alcanzaban leyes del 20% en cobre, frente a las actualmente explotadas en ese país de 0,87% en Olympic Dam.
- Mínima ley aceptable para la viabilidad proyecto: **SUBTERRÁNEA: 1.2-2% Cu**; **OP: 0.5% Cu**, bajando a 0.25% Cu cuando los subproductos resultan interesantes, o se explotan óxidos.
- Los pórfidos resultan el 60% de la producción de Cu con un 0.44%Cu de media (USGS2008)

USGS: 2002 0.49% Cu <> 2008 0.44% Cu →

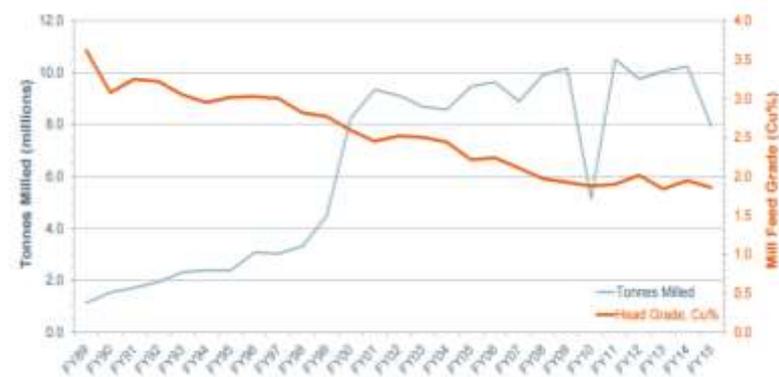
→ Factores origen de ese brusco descenso:

- menor extracción de sulfuros de cobre (mayor ley),
- mineral de menor ley en general,
- aumento minería de óxidos con menor ley (por el menor precio de la hidrometalurgia, que a su vez convierte el mineral de baja ley en reserva explotable)

# Historico del descenso en ley de cobre



Historical Cu grades and tonnes milled



- Sirva de ejemplo la fuerte disminución de leyes en Chile, con un 30% de las reservas mundiales (Escondida necesita fuerte desmonte, pero tiene grandes reservas, produciendo el 9% del suministro mundial de Cu, cayendo del 1.72% en 2007 al 0.97 en 2011 →

¡¡Una caída del 43% en 4 años !!

# Consumo energético y ley mineral

- El mayor consumo energético observado ante una menor ley en minería, es debido principalmente a la fase mecánica de la concentración (trituración y molienda).
- Sin embargo el fundido y refinado no se ven en exceso afectados por la ley inicial.

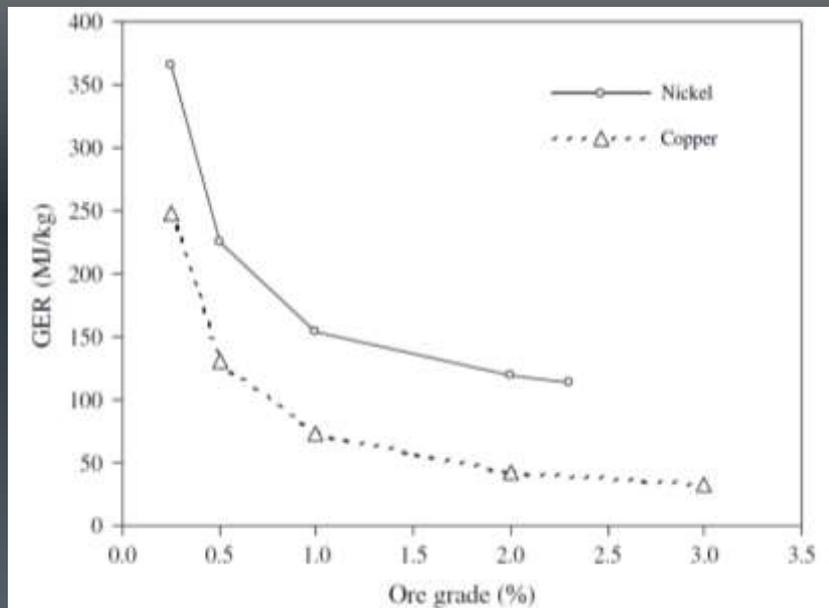
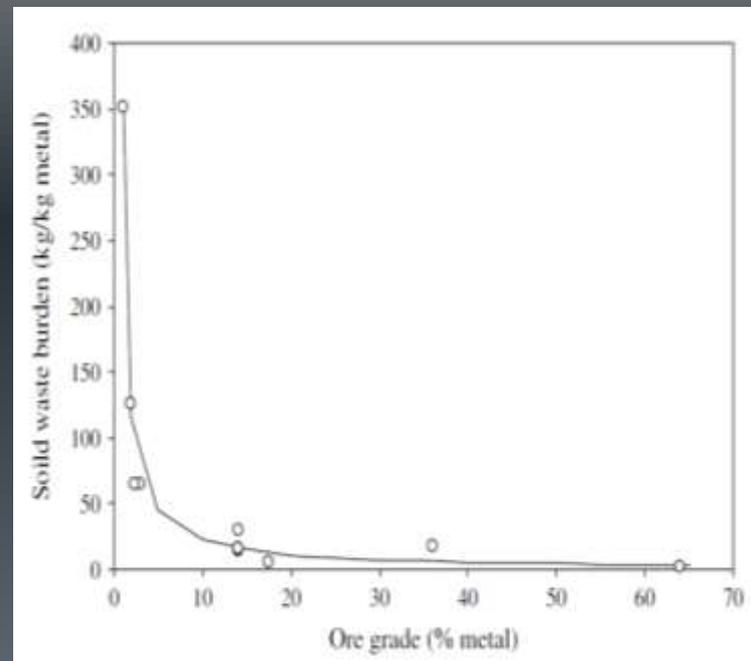


Fig. 11. Effect of ore grade on GER for copper and nickel productions.



# Consumos en metalurgia extractiva

- VÍA PIROMETALÚRGICA: horno y refinado electrolítico, para el beneficio de sulfuros como calcopirita ( $CuFeS_2$ ) que suponen el 70% de las reservas de cobre. *Menor consumo energético, pero produce  $SO_2$*
- VÍA HIDROMETALÚRGICA: proceso SX/EW permite el tratamiento de óxidos y minerales de baja ley (0.2% Cu), menor impacto ambiental al contenerse mejor el residuo líquido, más económico en pequeñas explotaciones, pero intensivo en consumo eléctrico (electrolisis).
- El uso en paralelo permite convertir el  $SO_2$  del horno en sulfúrico necesario para la lixiviación, evitando efluente más contaminante.

Environmental impacts for "cradle-to-gate" metal production

| Metal  | Process                                  | GER<br>(MJ/kg) | GWP<br>(kg CO <sub>2</sub> e/kg) |
|--------|--|----------------|----------------------------------|
| Copper | Smelting/converting and electro-refining | 33             | 3.3                              |
|        | Heap leaching and SX/EW                  | 64             | 6.2                              |

Metal production processes considered in the study

| Metal  | Feed                   | Process                                  |
|--------|------------------------|--|
| Copper | Sulphide ore (3.0% Cu) | Smelting/converting and electro-refining |
|        | Sulphide ore (2.0% Cu) | Heap leaching and SX/EW                  |

# Respuesta ante menores leyes

- El agotamiento futuro de la tipología habitual de explotación del cobre, el pórfido (modelo geológico, pero también económico, técnico y productivo, que acepta baja ley y elevado volumen, con bajo ratio de desmonte) podrá venir condicionado por la limitación medioambiental.
- ¿Aceptará la sociedad ese aumento en el consumo energético para lograr la misma cantidad de cobre ante una menor ley? Significará un aumento 2-7x GER en 2050 con escenario EERR, reciclado y demanda eléctrica.
- Se convertirá en una evaluación social que pondere la protección medioambiental, más que la escasez (0.2-1% Cu pórfidos; 0.005-0.03% Mo; 0.004-0.35 g Ag; 0.2-5 g Au), y el reparto de beneficios (“Economical Parity”).
- Una menor ley obliga a economías de escala que implican peores ratios, mayores consumos, escombreras y que marcarán el límite de la minería moderna. El estudio del LCA conducirá, en el caso del cobre, a la aparición de una minería subterránea que explote otras tipologías también económicas, en pugna con materiales sustitutos.



# Los modelos de depósitos minerales

# Sobre los modelos metalogenéticos

- Hasta la aparición del trabajo de Phillip Crowson en el año 2011 muy poco se ha escrito sobre la base geológica y genética de la producción mundial de cobre.
- Crowson explica cómo se agotan o sufren significativas reducciones a través de los tiempos, cuando se acaban las condiciones iniciales que los hicieron atractivos.
- La tecnología ayuda a los tipos que mejor se adaptan a nuevas exigencias, como el gigantismo, en un esfuerzo a superar las bajas cotizaciones, aprovechando las facilidades que presentan tipologías extensas, como son los pórfidos cupríferos.
- Crowson señala que en el año 1975, los pórfidos suministraban ya el 34% del cobre del momento, habiendo llegado al 62% mundial en el año 1998. Sin embargo, en 2009 esta proporción había caído hasta el 55%.

# Las tipologías o modelos

- El autor anuncia una poderosa razón que explica el descenso de las leyes puede deberse, entre otras razones, al cambio en el tipo de los depósitos explotables.
- En el siglo XIX una parte importante del cobre procedía de los VMS (sulfuros volcánicos sedimentarios), de los Skarns, del cobre filoniano y de los SH (Sediment Hosted).
- Con la caída de las explotaciones en África, Europa y el Este canadiense, estos tipos de depósitos han contado cada vez en menor proporción, aunque algunos parcialmente han resucitado.
- De esta manera, las nuevas minas de la región andina desplazaron el centro de la producción mundial de cobre mientras que ya, en 1988, los pórfidos eran el 47% y el 62% en 1998.

# Sobre los modelos metalogenéticos

- Se admite que siempre se explotan primero los recursos de mayor ley, los más accesibles y de mejor tratamiento. Además, los avances tecnológicos y la escala, logran superar a los descensos graduales y constantes de la ley, la accesibilidad y la complejidad metalúrgica.
- **Riotinto**, en España, fue el mayor productor mundial **en 1877** y explotaba con leyes del orden del **3% Cu entre 1883 y 1888**, declinando las leyes hasta el 1,21% Cu en 1925.
- Las leyes medias fluctuaron alrededor de un estrecho rango desde los últimos años de los 70 a los comienzos de la década de 2000. Sin embargo, a partir del año 2002 volvieron a caer de la misma forma que lo hicieron en los 70.
- Según Philip Crowson, **el ritmo de extracción de un depósito sube en tanto y cuanto las compañías buscan la economía de escala que repercutirá en las leyes límites del yacimiento**. Además, el progreso económico y la subida de la productividad tienden a aprovechar yacimientos no tenidos en cuenta con anterioridad. Sin embargo, la inevitable subida de los costes de producción poseen una dirección opuesta.

# Las tipologías o modelos

- Crowson también afirma que esa tendencia de los pórfidos ha contribuido en los últimos años al descenso del rendimiento en la producción de cobre.
- Este autor nos dice que no existe evidencia en la tendencia el tamaño y ley de los nuevos pórfidos. Por ello piensa que la bajada en la ley media de los yacimientos minados procede de la combinación de la desaparición de los otros tipos, no pórfidos (leyes elevadas respecto a los pórfidos) y su descenso en la ley (pórfidos) por agotamiento.
- Sin embargo, hay que considerar que la denominación “pórfido” trasciende a su origen metalogenético y es, además, un conjunto de características de la tecnología extractiva que le son comunes: escasas leyes de cobre, explotación predominantemente superficial, técnicas de explotación dimensionadas a enormes producciones....

# Las tipologías o modelos

- Hoy los esfuerzos por encontrar nuevas tipologías son evidentes: aunque predominantemente subterráneas, los skarns, los VMS y, sobre todo, los SH (Sediment Hosted) e IOGC que parecen resurgir como respuesta a las causas explicadas.
- Existen otros factores: el acceso a nuevos territorios, las presiones ambientales y sociales y el descenso relativo en los costes de explotación subterránea.
- No parece que las leyes de producción de un yacimiento se encuentren en total dependencia total con los precios de mercado, ya que resulta bastante complicado cambiar configuraciones de explotación en la mina y, sobre todo, necesitando un capital extra que a corto plazo no resulta fácil de conseguir.
- Existen **dos tendencias** cuando caen los precios del metal, o bien cuando suben, optando en cada caso (en altos precios de mercado) por explotar con prioridad las leyes altas o más bien lo contrario (caso de Phelps Dodge y Codelco en la crisis del 97).

# Las tipologías o modelos

- Los pórfidos cupríferos hasta hace pocos años (...) se caracterizaban por sus enormes volúmenes de recursos (miles de millones de toneladas en algunos yacimientos) de los cuales solo se consideraba una pequeña parte de mayor y más fácil acceso y con un desmonte muy moderado.
- Su ley actual había sido una consecuencia de la desaparición de una parte de sus mejores concentraciones. Este proceso ha sido paulatino pero también inexorable, tan solo modificado por la masiva explotación de minerales secundarios consecuencia de las innovaciones introducidas en el proceso de SX/EW.
- Siempre existen excepciones, incluso la explotación de recursos existentes a cierta profundidad, sobrepasando ampliamente una mínima razón de desmonte compatible con un cut-off reducido a causa de los bajos costes derivados del gigantismo de las explotaciones.

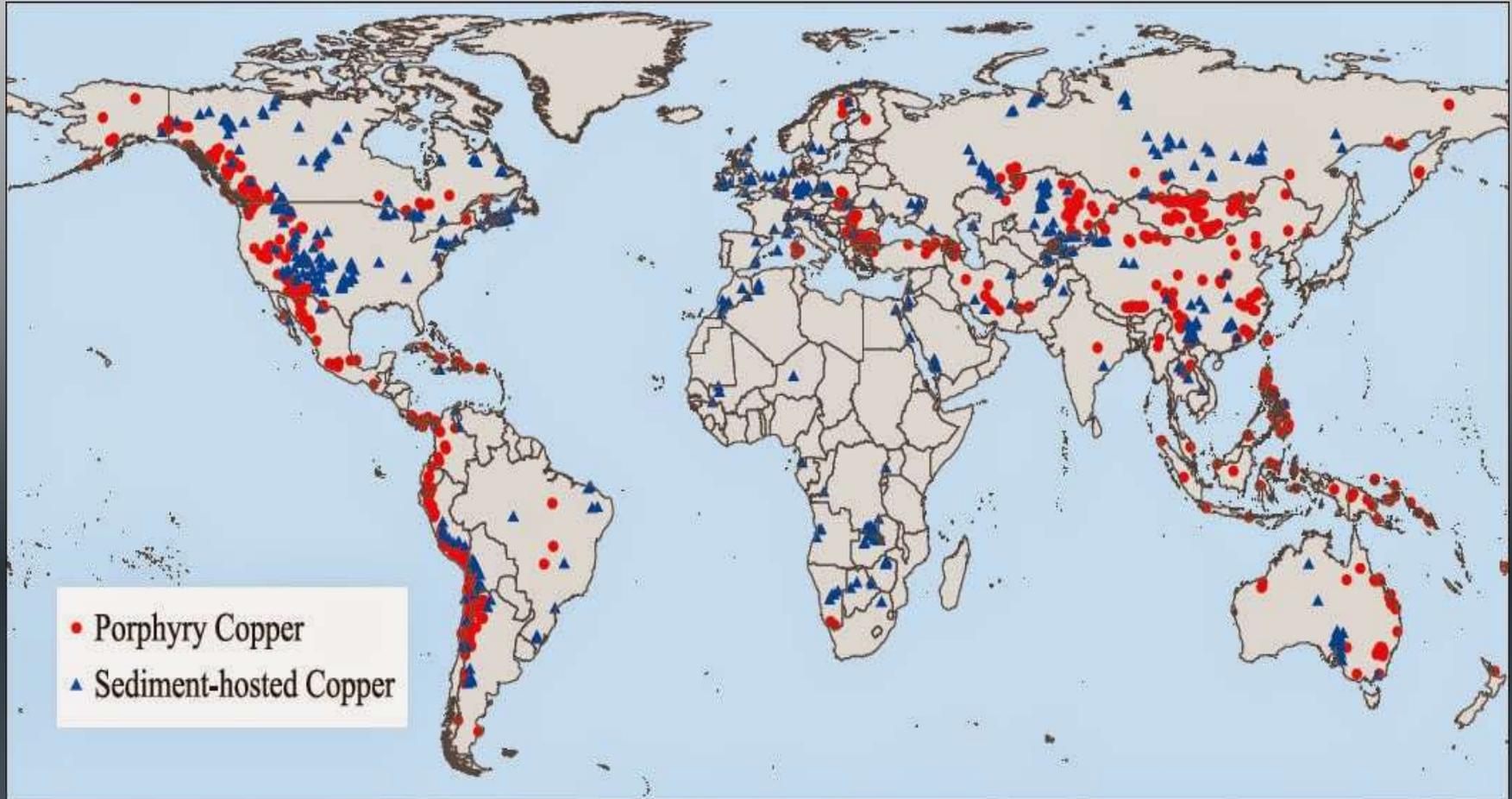
# Las tipologías o modelos de los yacimientos de cobre

- La formulación de los modelos metalogenéticos nace de la necesidad de una comprensión del fenómeno de su creación con vistas a facilitar nuevos descubrimientos.
- Un aspecto de la expresión de los diferentes tipos de yacimientos es su asociación con series particulares de las rocas que los albergan (Stanton, 1972).
- Esta asociación refleja ampliamente tanto el entorno geológico y como los procesos que han contribuido a la formación del depósito. Las asociaciones identificadas se han utilizado ampliamente en la exploración minera.

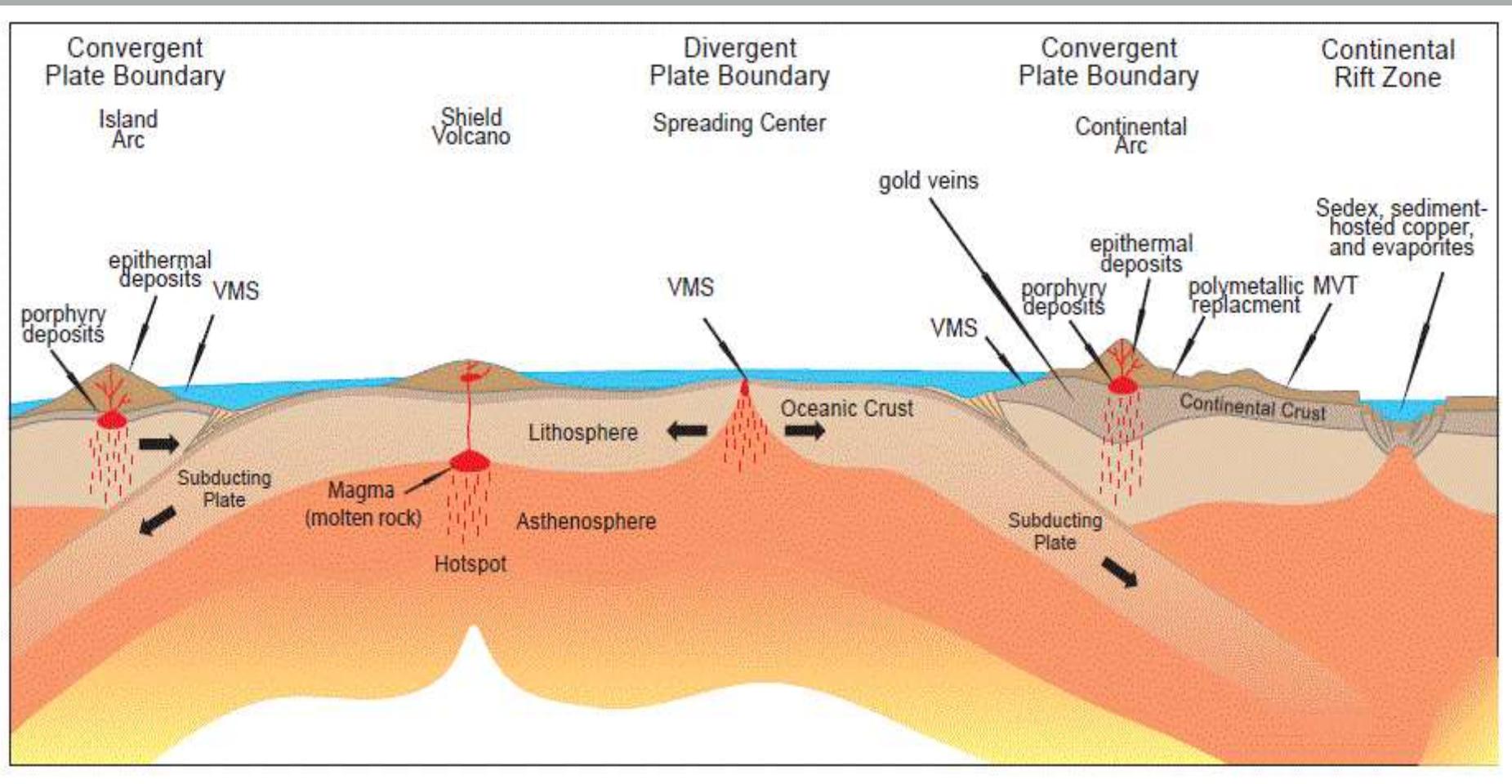
# Las tipologías o modelos de los yacimientos de cobre

- Los geólogos generalmente prefieren los sistemas de clasificación genética que también incorporan elementos de su composición, forma y asociaciones minerales.
- El sentido del modelo viene a reflejar, no solo la génesis del depósito, sino que también asume su sentido económico, técnico y productivo.
- Así, como ejemplo, para un pórfido de cobre, al aceptar el término, también se asumen sus condiciones genéricas de muy bajo ratio de desmonte, forma más o menos esferoide, ley baja, conocimiento o dominio metalúrgico de su concentración, intervalo de riqueza sus concentrados y varios aspectos más.

# Modelos y Geografía (Cu)



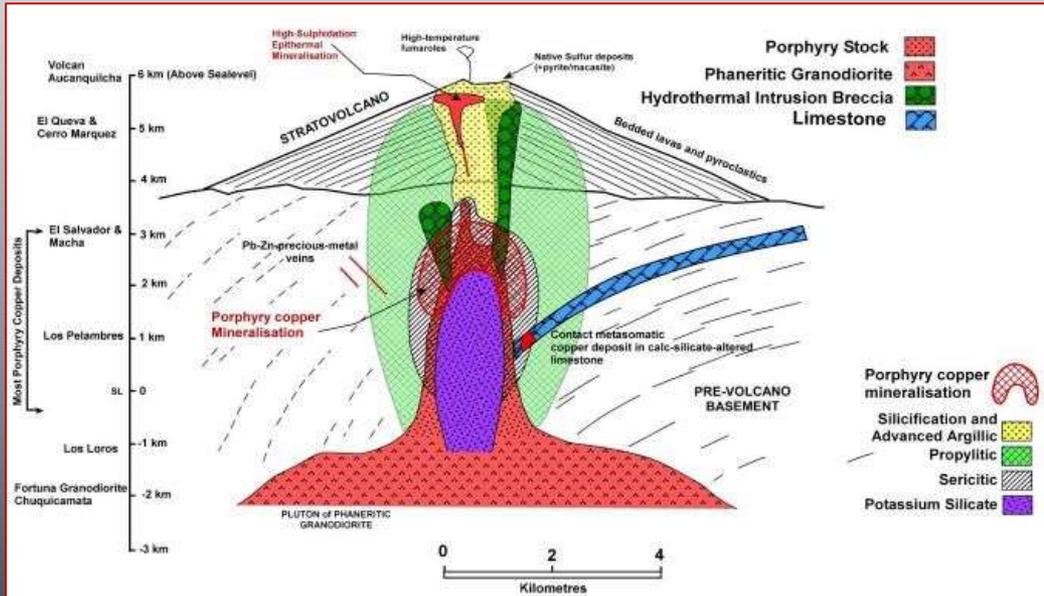
# MODELOS y Génesis (Cu)



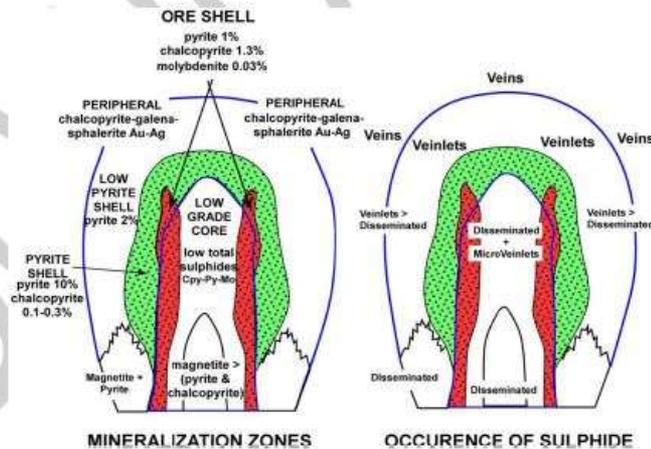
# a. Los pórfidos cupríferos

- Los pórfidos de cobre son el resultado de las complejas interacciones de muchos procesos genéticos. Un depósito de pórfido de cobre se define por la existencia de los siguientes fenómenos geológicos:
  - 1. Presencia de sulfuros de cobre que se localizan en una red de venillas o “stockwork” y como diseminación de granos en la matriz de la roca;
  - 2. Alteración y mineralización en profundidad hasta 1-4 kilómetros, genéticamente relacionada con depósitos de magma emplazados bajo la corteza (6-8 km), de composición de intermedia a silícea de arcos magmáticos y encima de las zonas de subducción;
  - 3. Complejos intrusivos que se emplazaron en el momento anterior a la formación de los depósitos de pórfido. Predominio de geometrías en forma de stocks de forma cilíndrica y vertical;
  - 4. Áreas con superposición de alteraciones marginales propilíticas y fílico-arcillosas, y rodeadas por un conjunto de alteración potásica;
  - 5. Cobre introducido durante los sucesos de alteración fílica-arcillosa.

# MODELO: Pórfidos de Cu-Au-Mo



ss-section showing alteration zones around a porphyry system, and the vertical scale of the mineralising system which can span up to 8 km of the crust (modified from Sillitoe 1973).



Lowell and Gilbert porphyry copper model (1975)

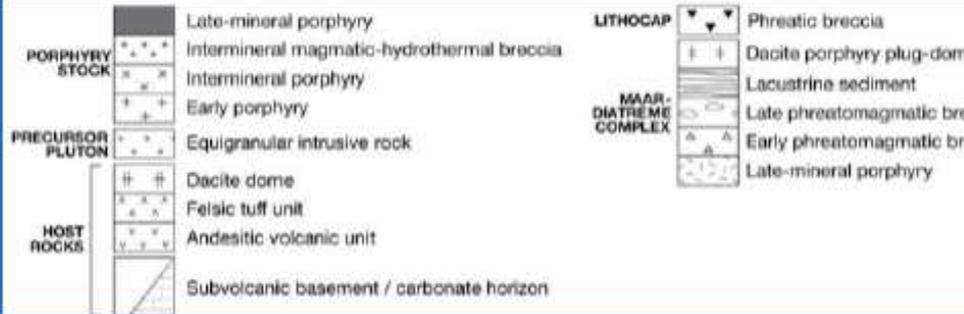
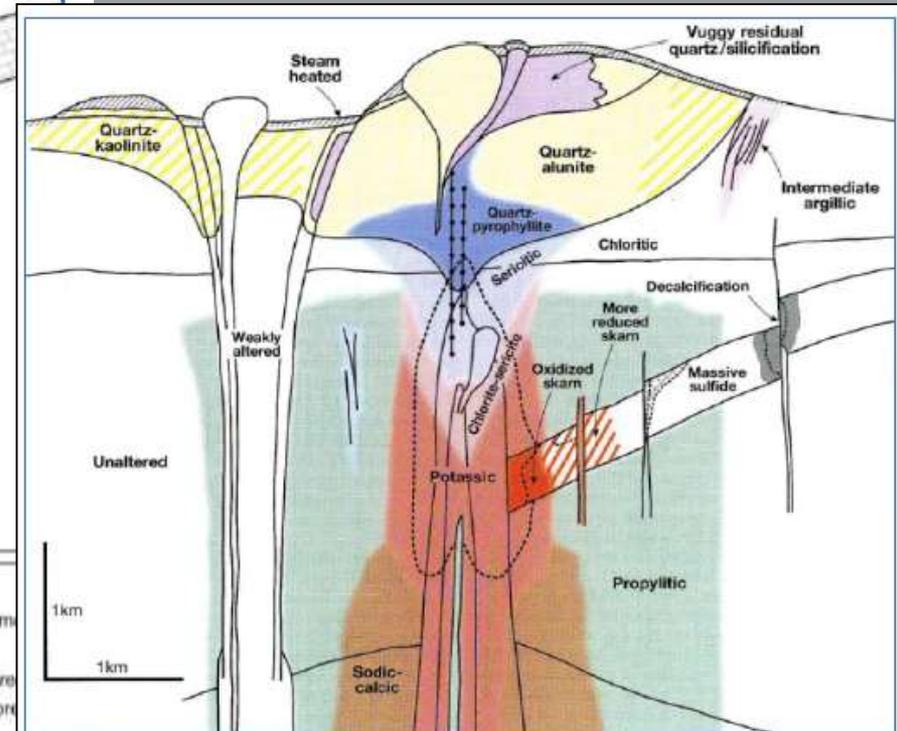
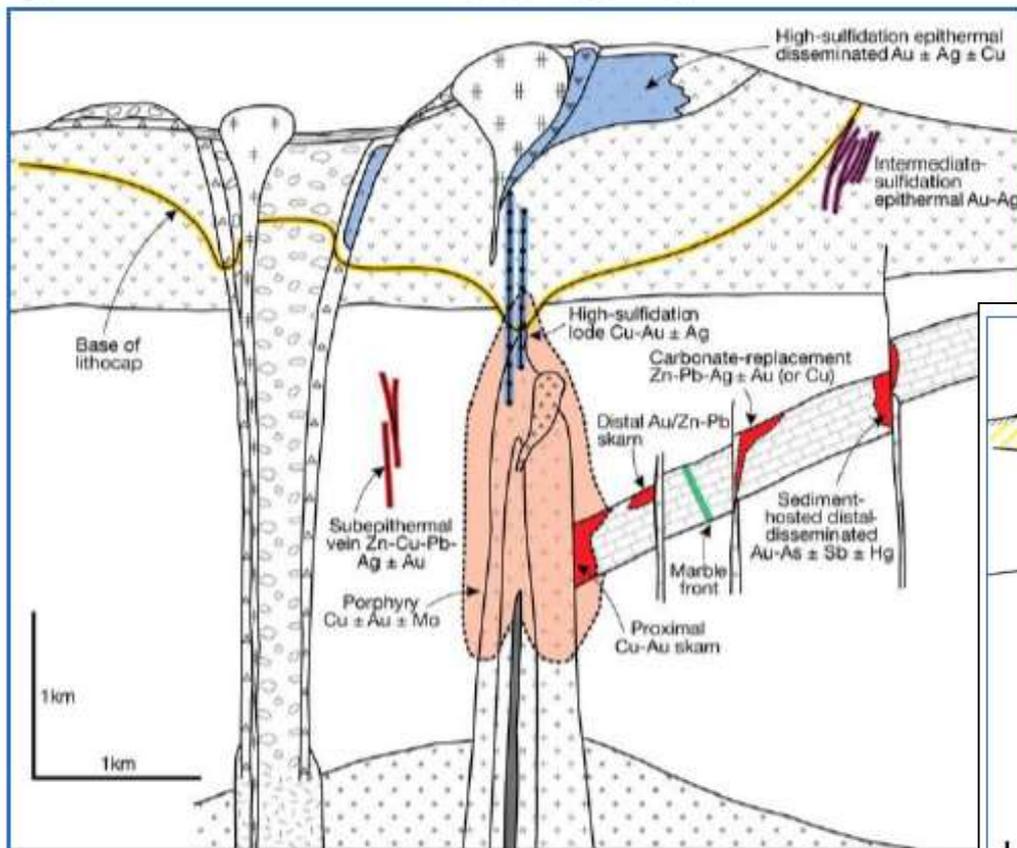
# Relación modelo-tecnología de explotación

- La morfología de cilíndrica a esférica junto (a veces) sus enormes dimensiones y, actualmente, su baja ley, son las características fundamentales que influyen en el aprovechamiento de los pórfidos de cobre.
- Los bajos costes de producción son consecuencia del uso de maquinaria de grandes dimensiones y, sobre todo, por los bajos ratios de desmonte.
- Además, la intensa explotación acaecida en los últimos años ha reducido sustancialmente su ley y no tanto el tonelaje que albergan.
- De hecho, ya han comenzado sus adaptaciones: minería subterránea de alta productividad y bajo coste, minería subterránea en zonas de alta ley, intensidad productiva con minerales de baja ley y otros.

## b. Los skarn de cobre

- Los skarns son rocas metamórficas de grano grueso compuestas por minerales silicatados que se forman por sustitución de rocas carbonatadas durante el contacto o metamorfismo de contacto o regional.
- La mayoría de los grandes depósitos de skarn del mundo están relacionados con los sistemas hidrotermales. Los skarns son depósitos minerales de una relativa alta temperatura y relacionados con la actividad magmática-hidrotermal asociada con plutones graníticos en ambientes orogénicos.
- Los skarn **suelen ser más pequeños que los pórfidos, pero, de mayor concentración metálica.** Puede decirse que los skarns se forman cuando un plutón ácido invade series sedimentaria que contienen episodios carbonatados.
- Los principales procesos involucrados en la génesis: (1) el metamorfismo de contacto durante el emplazamiento del plutón, (2) la formación metasomática progradante cuando el plutón se enfría y se desarrollan fluidos mineralizadores, y (3) la alteración retrógrada de las asociaciones anteriores.

# Oyu Tolgoi en Mongolia (2016)



Note: Figure from Sillitoe (2010).

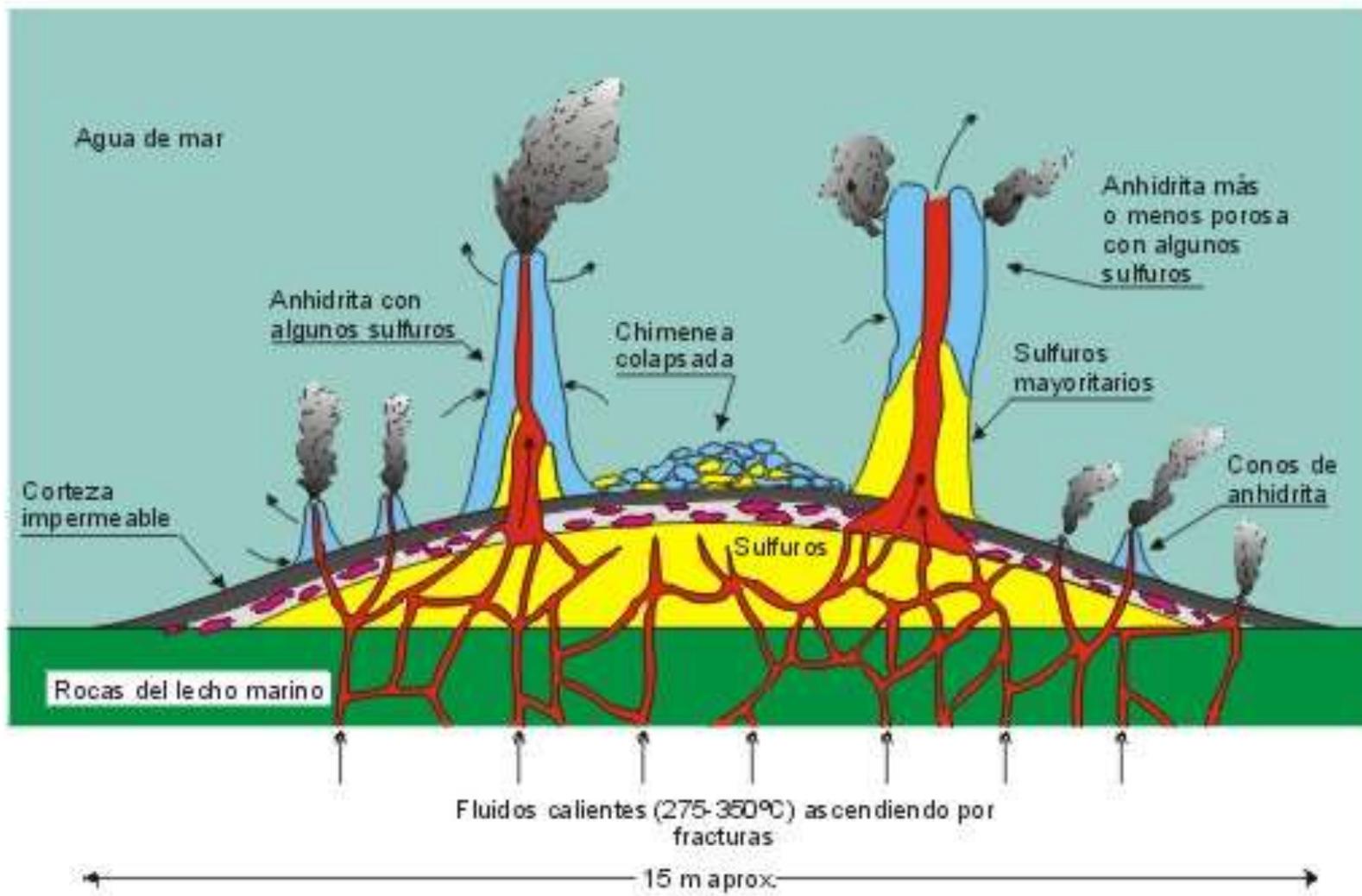
Note: Figure from Sillitoe (2010).

# Relación modelo-tecnología de explotación

- La mayor parte de los minerales económicos de skarn están presentes como exo-skarn, formando una mineralización en las rocas carbonatadas que la aloja.
- Los yacimientos de cobre tipo skarn son menos abundantes que los pórfidos del mismo metal, son más difíciles de descubrir y suelen ocupar posiciones no accesibles al reconocimiento superficial y directo.
- Suelen ser más ricos (en parte porque no han sido descubiertos con anterioridad), son más irregulares y, a veces, de difícil predicción, tanto geométrica como de sus leyes.
- La mayoría de los nuevos yacimientos son de explotación subterránea y su importancia no decaerá en el futuro, siempre apoyados en la calidad unitaria o concentración de metal.
- Son difíciles de valorar y su planificación en mina requiere de mucha experiencia. La dilución en la explotación debido a su complejidad geométrica es alta y requiere un reconocimiento previo, más detallado que en los pórfidos a los que se encuentran relacionados.

## c. Yacimientos Volcánico-Sedimentarios (VMS)

- Corresponden a cuerpos estratiformes de sulfuros en unidades volcánicas o en interfases volcánico-sedimentarias depositadas originalmente en fondos oceánicos.
- Consisten en un 90% en pirita masiva, y contienen cantidades variables de Cu, Pb, Zn, Ba, Au y Ag. Los VMS se presentan en grupos y en áreas específicas y están restringidos a un número limitado de niveles estratigráficos.
- Existe una asociación con rocas volcanoclásticas. Debajo de los depósitos de sulfuros normalmente existe un stockwork de venillas de sulfuros en rocas intensamente alteradas, que ha sido el alimentador de los fluidos hidrotermales. El stockwork en ocasiones puede poseer leyes económicas.
- Estos depósitos están formados por emanaciones de fluidos hidrotermales asociadas al volcanismo submarino y se trata de depósitos singenéticos con la actividad volcánica submarina a la que se asocian.
- La mineralogía corresponde a una mezcla de sulfuros metálicos dominados por pirita y/o pirrotina con cantidades variables de calcopirita, esfalerita y galena. La galena y esfalerita se ubican en la mitad superior de los depósitos, mientras que la calcopirita se concentra en la porción inferior y gradúa hacia abajo a un stockwork de venillas.





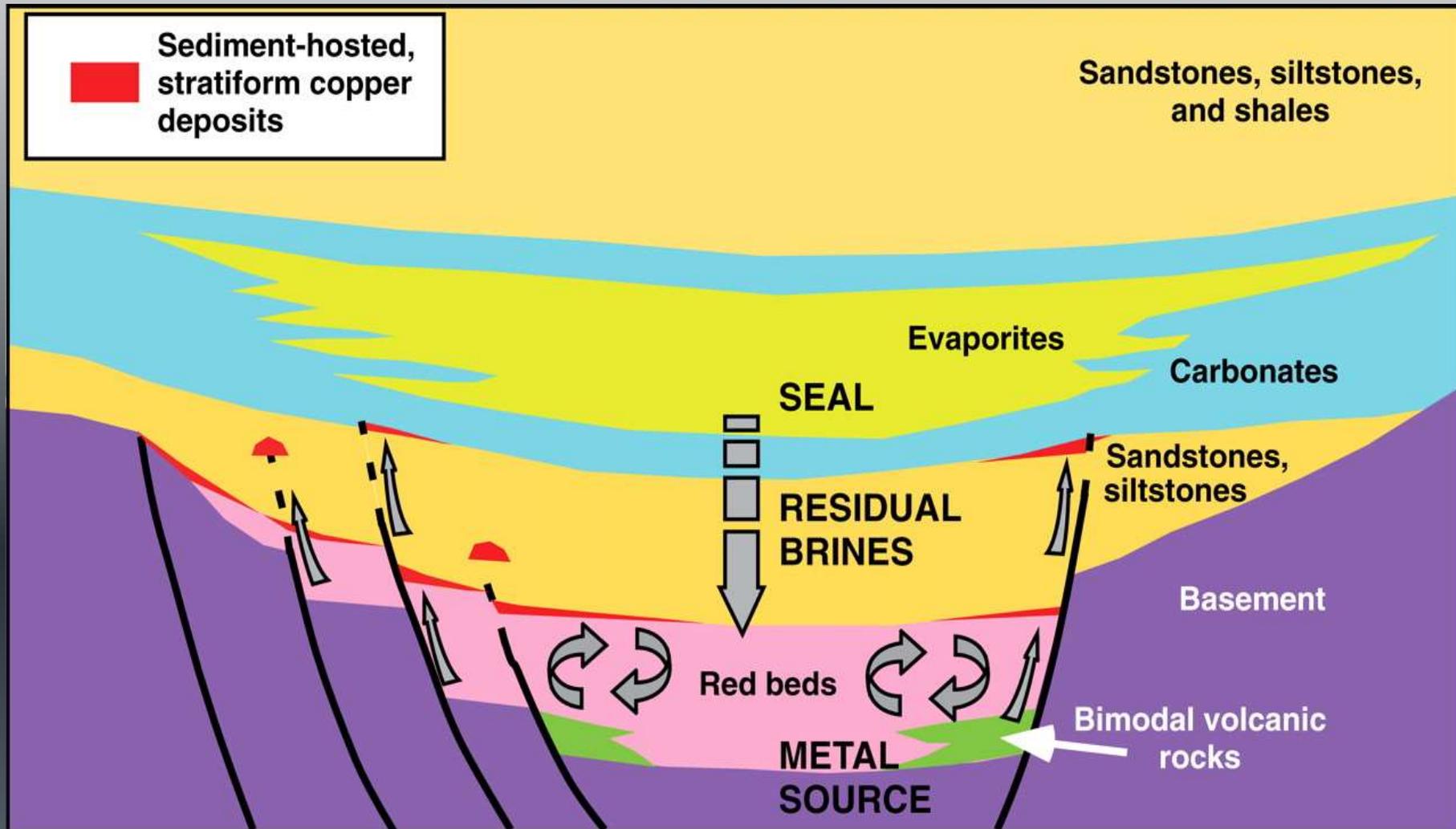
# Relación modelo-tecnología de explotación

- La mayoría de los depósitos de sulfuros masivos del mundo son relativamente pequeños y el 80% de los depósitos conocidos está en el rango de 0,1 Mt a 10 Mt. De estos, la mitad contiene <1 Mt de mineral.
- Sin embargo, estos depósitos también pueden ser relativamente grandes o de alta ley. Se explotan distritos en que existen numerosos cuerpos mineralizados formando grupos.
- Las riquezas iniciales han acabado con la existencia de los yacimientos superficiales. Hoy, la mayoría de los proyectos VMS son subterráneos y a veces selectivos. Al encontrarse en áreas plegadas es frecuente hallarlos en posición verticalizada.
- El método de “cut and fill” es el que predomina en yacimientos pequeños o medianos. A veces las grandes cámaras son posibles.
- La mineralogía variada y, sobre todo, el intercrecimiento a tamaños de grano muy fino y la presencia de metales no deseados, es otra dificultad de su aprovechamiento. La abundancia de sulfuros es un reto para mantener el medio sin generar aguas ácidas.

## d. Yacimientos de cobre en series sedimentarias (SH)

- Se encuentran estratoligados, es decir, están restringidos a un estrecho rango de capas dentro de una secuencia sedimentaria. Son epigenéticos y diagenéticos, formándose después de la deposición del sedimento huésped, antes de su litificación.
- Los tipos de rocas huésped son dos: calizas o sedimentos dolomíticos de baja energía, pizarras y rocas carbonatadas de origen marino o lacustre; y areniscas de alta energía, arcosas y conglomerados de origen continental.
- Existen dos tipos principales: de “facies reducidas con cobre” y “Red-beds” con cobre. Las rocas proterozoicas superiores y, sobre todo, las rocas neoproterozoicas son las más productivas. Las rocas del Pérmico en Europa y las rocas carboníferas inferiores en Asia Central son menos importantes. Otros pequeños depósitos se encuentran en el Phanerozoico, como en España.
- El ambiente deposicional se relaciona con sedimentos altamente permeables en cuencas epicontinentales poco profundas y cerca del paleoecuador. En sabkhas y en sedimentos con alta tasa de evaporación, pero la configuración fundamental es tectónica. Los ambientes favorables son los relacionados con los rifts intracontinentales, los brazos fallidos de las uniones triples en aperturas intracontinentales y los márgenes continentales pasivos.

# Modelo "Sediment Hosted" SH-Cu



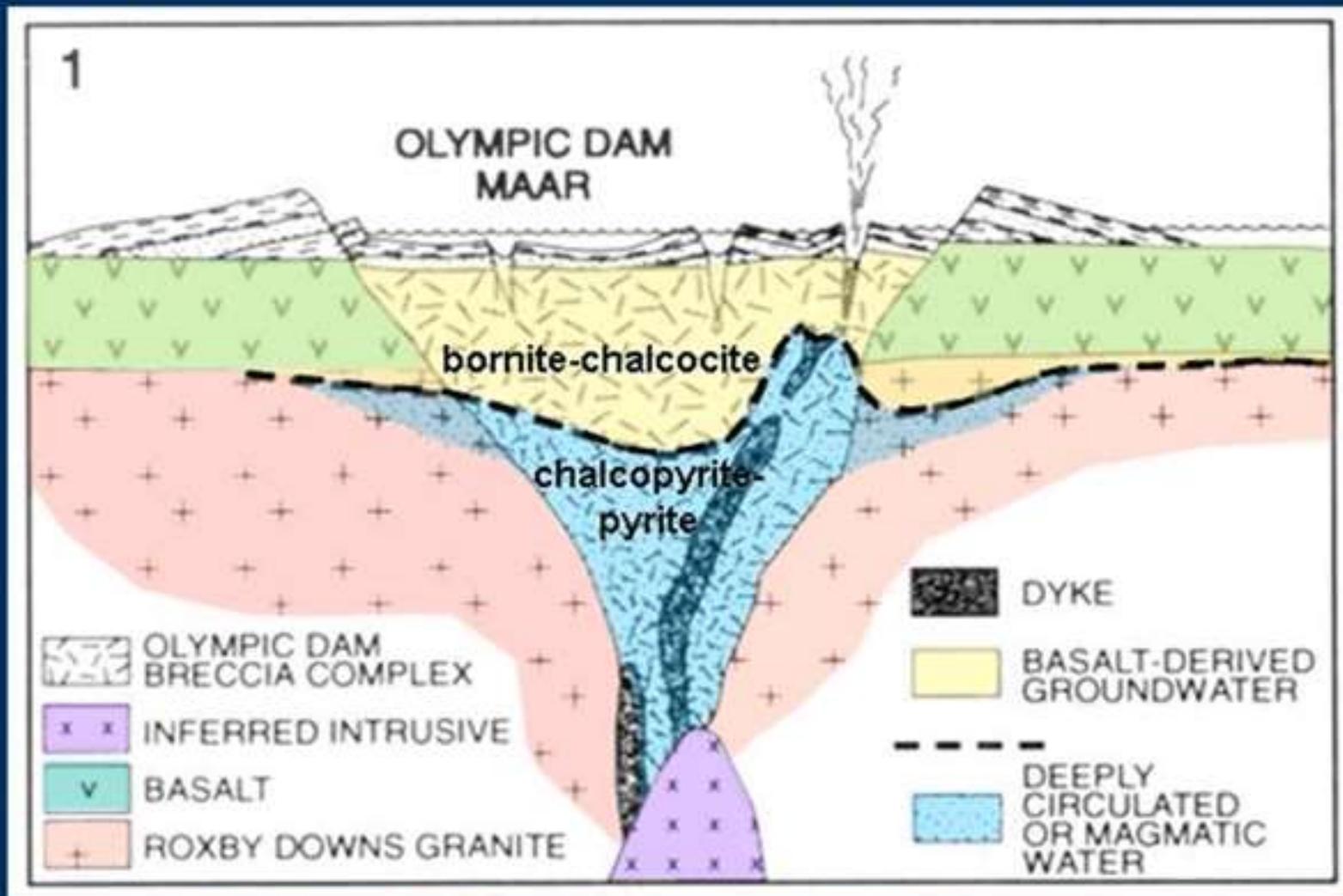
# Relación modelo-tecnología de explotación

- Los yacimientos de cobre tipo “Sediment Hosted” habían sido en parte olvidados debido a las condiciones geopolíticas de su aprovechamiento.
- Las potencias discretas de los SH se traduce en su explotación predominantemente subterránea. La buena definición de sus hastiales (baja dilución en el arranque), la continuidad de sus cuerpos mineralizados y, sobre todo, su ley media, ayudan a su explotación. Por su geometría variable será necesario el cambio de sistema de explotación, pasando de Cámaras y Pilares con relleno a Subniveles cuando se verticaliza.
- Su mineralogía, con presencia de sulfuros más ricos en cobre que la calcopirita, produce concentrados de alta ley relativa en cobre, con lo que mejora el NSR del concentrado del yacimiento.
- La presencia de otros metales de alto valor unitario, sobre todo el cobalto y la plata, ayuda casi siempre en los resultados económicos de su explotación.

## e. Los IOCG

- Son depósitos de óxido de hierro Cu-Au en forma de vetas y cuerpos de hematites y/o magnetita alojados en brechas con minerales diseminados de Cu, Au, Ag, Pd, Pt, Ni, U y Tierras Raras.
- Esta tipología de yacimientos se forma en cuencas sedimentarias o volcano-sedimentarias intruídas por rocas ígneas. Los depósitos minerales se asocian de manera amplia con situaciones redox y se caracterizan por la alteración sódica de las rocas fuente y la alteración potásica de las rocas hospedantes.
- El enorme tamaño, la metalurgia relativamente simple y las altas leyes son características de este modelo que se traduce en explotaciones, a veces muy rentables.
- También, los depósitos de IOCG se distinguen por su mineralogía. Los minerales más común es la calcopirita, formando 10-15 por ciento de la masa de roca. El mineral de la ganga es, típicamente, la hematites. Estos depósitos son principalmente de cobre de anfitrión, sin embargo, pueden o no contener niveles económicos del oro.

# Olympic Dam: breccia-hosted, shallow, hematitic



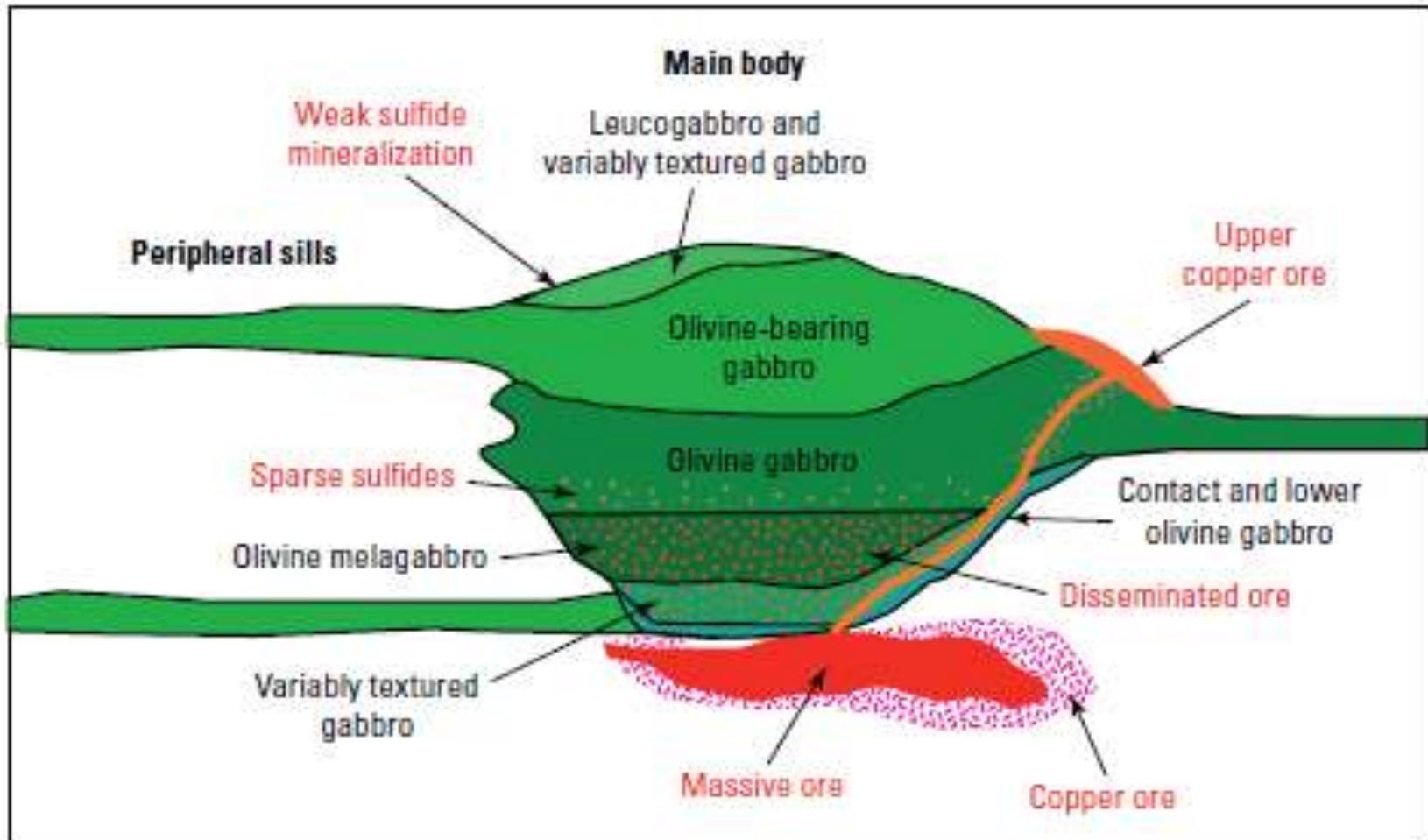
Haynes et al. (1995) fluid mixing model

# Relación modelo-tecnología de explotación

- El tonelaje de estos yacimientos varía ampliamente desde más de 3.800 millones de toneladas en Olympic Dam en Australia hasta los 470 millones de toneladas en La Candelaria, Chile.
- Dentro de los 33 depósitos de IOCG del USGS se pueden reconocer dos poblaciones de leyes y de tonelaje: 12 en depósitos alojados en venas y 21 en brechas o zonas de fallas.
- La diferencia en el tonelaje (mediano 3,5 mill. t a 120 mill. t entre los primeros y los segundos) refleja el tipo y la extensión de la permeabilidad en la roca huésped y la cantidad de espacio abierto disponible para la deposición de minerales.
- La explotación de sus variedades de mayor tamaño admite la explotación **subterránea de gran tonelaje apoyada en sus notables leyes de cobre.**
- El aprovechamiento de **otros minerales acompañantes** también es otra característica. Así, Olympic Dam no solo es una principal productora de cobre sino una de las mayores concentraciones de uranio del mundo. La presencia de oro también es otro factor recurrente en muchos yacimientos de este tipo. Además del mineral de hierro, sobre todo de la magnetita, resulta una buena ayuda para la economía de estos depósitos.

## f. Cobre magmático

- Los depósitos de sulfuros magmáticos de Ni-Cu se producen en cuerpos máficos o ultramáficos emplazados en diversos entornos geológicos. En edad, varían desde el Arcaico hasta el Terciario, pero el mayor número de depósitos son Arcaicos y Paleoproterozoico.
- Aunque estos yacimientos aparecen en la mayoría de los continentes, los yacimientos productivos (depósitos con tamaño y ley suficientes para ser económicos) son relativamente raros.
- Los depósitos de sulfuros de níquel-cobre pueden aparecer como lentejones de sulfuros dentro de cuerpos máficos y/o ultramáficos. Típicamente, estos yacimientos poseen leyes de mineral entre 0,5% y 3% de níquel y entre 0,2% y 2% de cobre. Los tonelajes de depósitos individuales oscilan entre unas decenas de miles y decenas de millones de toneladas.
- En los depósitos magmáticos de Ni-Cu los sulfuros tienden a concentrarse en las partes inferiores de los cuerpos máficos o ultramáficos. La mineralización de sulfuros se puede dividir en diseminados y masivos, dependiendo de una combinación del contenido de sulfuros de la roca y la textura del silicato.
- La mineralogía de los sulfuros de Ni-Cu consta normalmente de un intercrecimiento de pirrotita, pentlandita y calcopirita. El cobalto, los PGE y el oro se extraen de la mayoría de los minerales magmáticos de Ni-Cu como subproductos. Además, los depósitos pueden contener entre el 1% y 15% de magnetita asociada.



- Sección del yacimiento de Noril'sk (Russia) mostrando su estructura interna, litologías y los principales tipos de depósitos.

# Relación modelo-tecnología de explotación

- Aunque existen yacimientos subterráneos de Ni-Cu magmáticos, los grandes depósitos por su magnitud y cercanía a la superficie se extraen a cielo abierto y en condiciones difíciles, como Norilsk y los canadienses.
- Casi siempre **es el níquel** el metal que provoca la explotación del conjunto (un precio hasta tres veces del cobre). Los metales acompañantes **muchas veces son decisivos (cobalto y platinoideos, sobre todo)**.
- Las leyes de níquel y de cobre suelen ser semejantes. No es raro encontrar **el concentrado global** de Ni-Cu por flotación (menor valor individual). El concentrado no suele pasar de un 15% Ni-Cu. Ello es debido a los problemas de separación entre ambos metales y a la pérdida de recuperación.



# Los proyectos y sus indicadores

# Precios del metal en los mercados

- Son un output, no un input, marcados por la oferta y la demanda

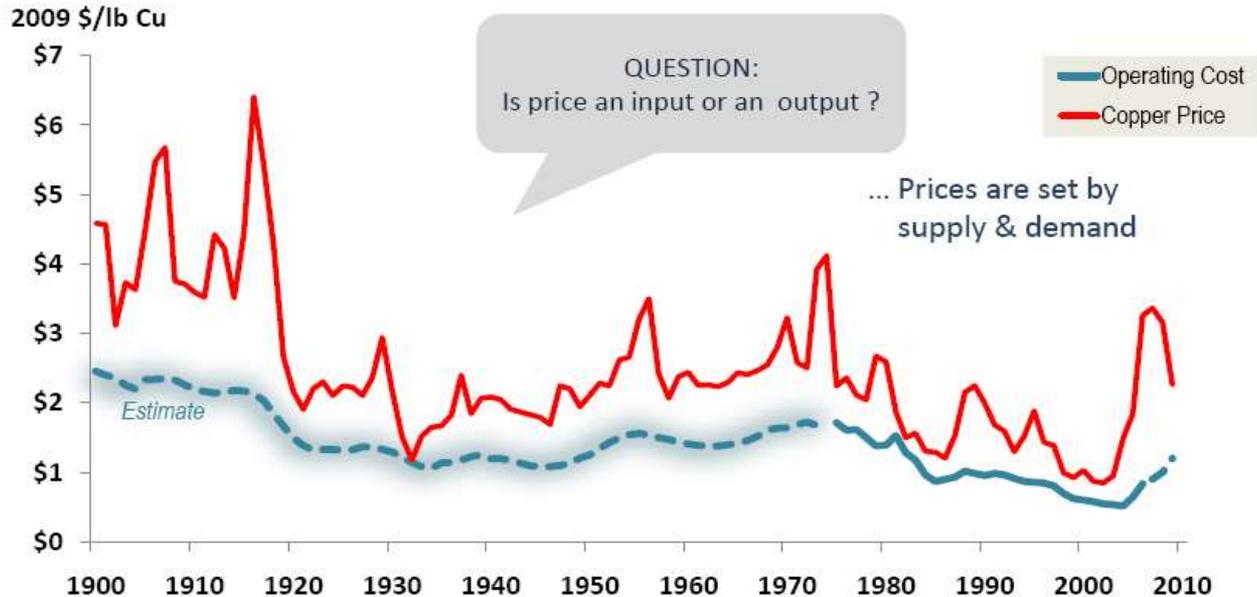
- **Motivación:**

- Cash cost: reducidos 30% econ escala, 70% tecnología, sin embargo aunque hayan disminuido en 2015 (esfuerzo gestión, tipo cambio moneda, coste energía), aumentan con una menor ley o con la explotación subterránea
- Disminución leyes y aumento de costes (excepción 2015-2016)
- Nivel de competencia costes (Continuas mejoras, Rio Tinto Phelps dodge estrategia mineral pobre 1995; 5 fuerzas de Porter estrategia)
- Desfase variación stocks ante crecimientos bruscos económicos, dejando el precio en manos de los productores (excepción temporal). Tras GM cambia poder de manos de minería al comprador.
- Desfase variación demanda vs. inicio producción en mina (exploración) período maduración proyecto minero
- Especulación en caso del cobre
- Desconocimiento de la naturaleza (tipologías)
- Comunicaciones previendo escasez, desaparición yacimientos “prime”
- Aparición sustitutos o nuevos usos (vehículo eléctricos)

# Precios reales y costes

Over the last 100 years, the real price and cost of copper has halved

Copper price and (estimated) average operating costs for Western World: 1900-2009



Sources: USGS, Brook Hunt, CRU  
MinEx Consulting estimates (for 1900-1974)

Includes, transportation, smelting & refining and marketing costs

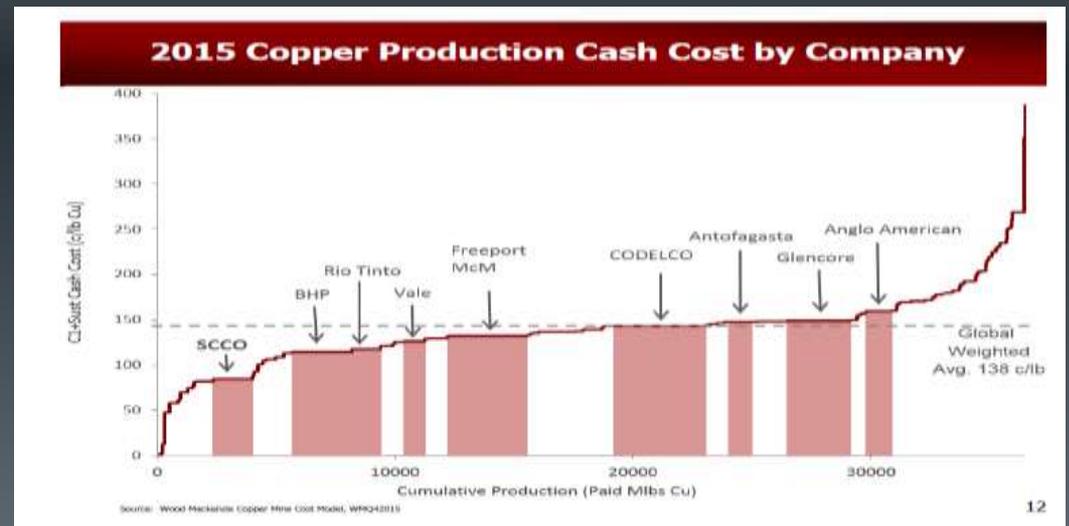
|      | Producción | Ley planta |        |
|------|------------|------------|--------|
| 2004 | 1.733      | 0,94%      | } -19% |
| 2011 | 1.735      | 0,84%      |        |
| 2015 | 1.732      | 0,76%      |        |

# En la dimensión del PROYECTO: El precio del metal y su elección

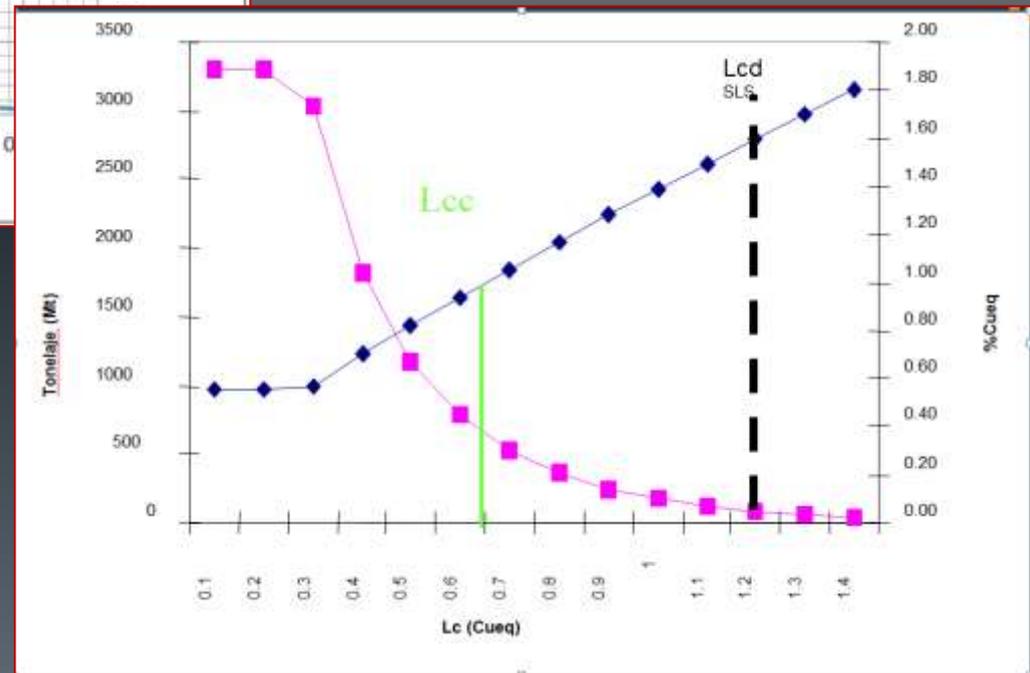
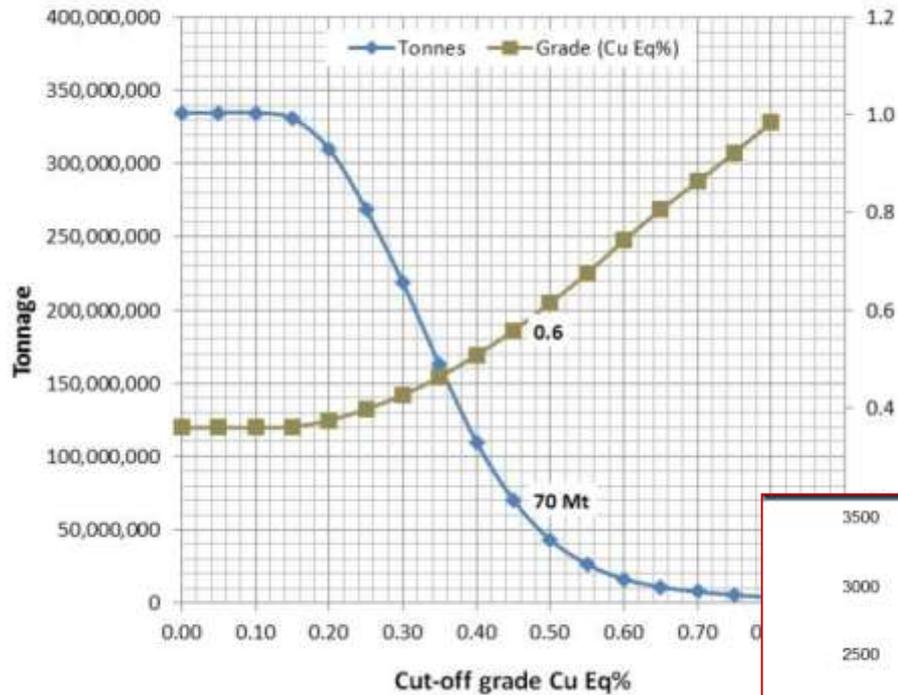
- Encontrar el precio adecuado significa fijar una cifra que reúna las condiciones de defensa ante la volatilidad de las cotizaciones con el suficiente conocimiento de la oportunidad en los mercados. Además de los factores de calidad del propio yacimiento, la experiencia y la adecuación de la tecnología disponible configurarán los criterios de elección de esta cifra.
- Por tanto es competencia de la empresa emprendedora decidir por la estrategia adecuada a su perfil de aceptación de riesgo y la formulación de los objetivos sobre la calidad del objeto a beneficiar, siempre bajo una mirada geológica experta.

# A corto plazo: posición de la competencia

- ❖ Otro criterio de elección: el nivel de competencia.
- ❖ La mayoría de los nuevos proyectos mineros pretenden estar dentro del percentil 50% de la curva de costes (para el cobre basado en \$/libra Cu o en \$/tonelada de cobre producido), que es casi un requisito previo para la obtención de financiación de los nuevos proyectos.
- ❖ Para llegar a esta posición es necesario conseguir un proyecto con alta ley en cobre, o bien, un coste de operación muy bajo o una combinación de ambos.



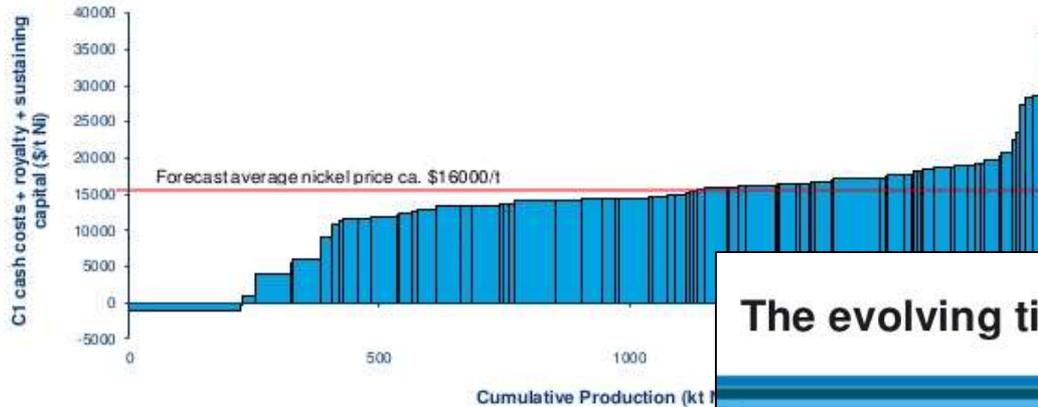
# La relación ley-tonelaje



# A corto plazo: posición de la competencia

Níquel

Current cost curve (C1+royalty+sustaining capital)



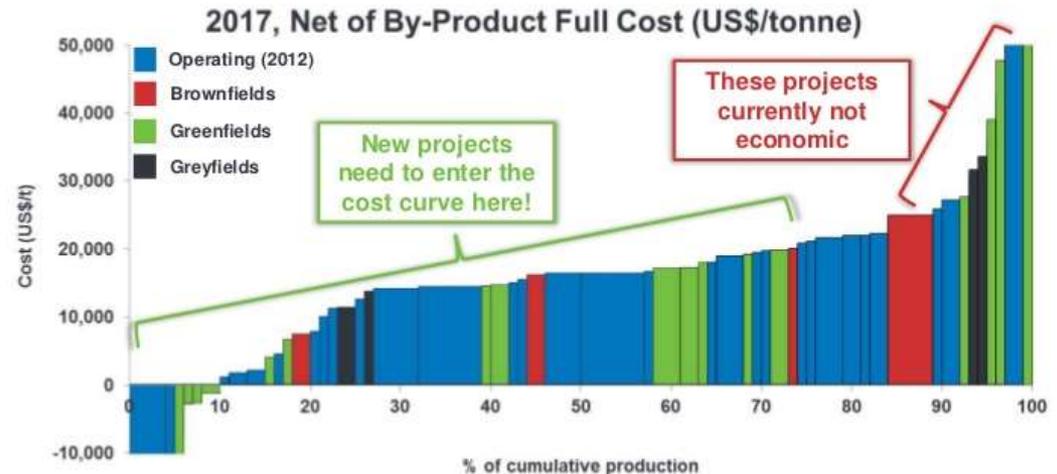
Source: Wood Mackenzie

Wood Mackenzie

❖ Otro criterio de elección: el nivel de competencia.

Estaño

The evolving tin supply curve



Greenfields Research  
A FRESH VIEW OF MINING

Data: ITRI/Greenfields Research

# Ley de Corte

- Si bajan los costes >> baja la Ley de corte >> aumentan los recursos conocidos: disminuir la ley a la mitad aumenta las toneladas de mineral por seis y las de metal por tres

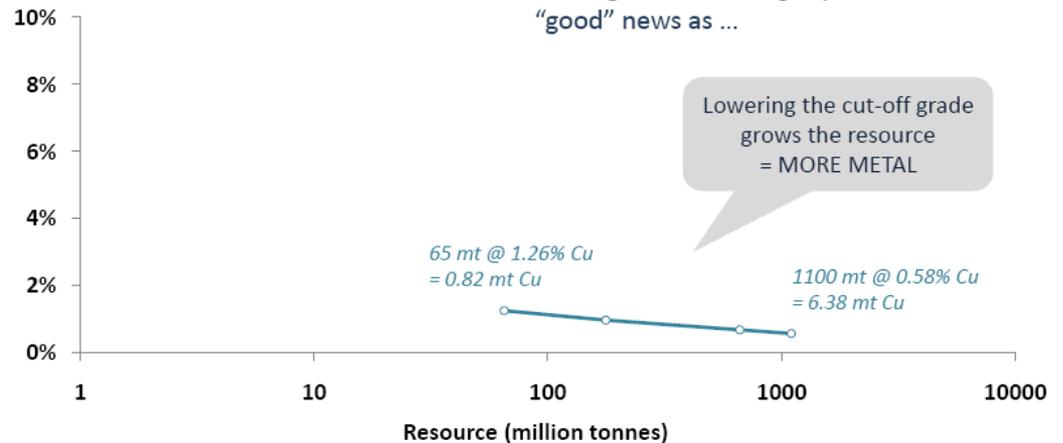
Most of the huge growth in known resources in the last 70 years can be attributed to a reduction in cut-off grades  
Change in pre-mined resources for 12 giant porphyry deposits: 1929-2008



## There is a trade-off between tonnes and grade

Rio Blanco copper deposit

Grade (%Cu-equiv)



# Tabla resultado leyes y costes en la minería del cobre

- Datos de 120 explotaciones (15.2 Mtpa, 80% producción global Cu)
- Considerados óxidos de cobre
- Incoherente la subida en ley 2011-2016 y futuro (escenarios positivos para viabilidad en minas futuras).
- Los costes decrecen, lo cual está en contra de la disminución de ley, pero favorecido por los períodos de crisis

| media TODOS AÑOS |           | VMS   | SH    | POR   | IOCG  |
|------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
|                  | CASH COST | 0,83  | 1,51  | 1,25  | 1,23  |
|                  | GRADE     | 3,3%  | 1,9%  | 0,7%  | 1,6%  |
|                  |           |       |       |       |       |
| Futuro >2017     | CASH COST |       |       | 0,95  |       |
|                  | GRADE     |       |       | 0,67% | 1,20% |
|                  |           |       |       |       |       |
| 2011-2016        | CASH COST | 0,89  | 1,49  | 1,21  | 1,27  |
|                  | GRADE     | 3,71% | 1,90% | 0,77% | 1,66% |
|                  |           |       |       |       |       |
| 2000-2010        | CASH COST | 1,03  | 2,85  | 1,36  | 1,07  |
|                  | GRADE     | 4,16% | 1,50% | 0,42% | 1,40% |



# El cobre y su futuro

# Los futuros suministros de minerales y metales

- “La experiencia actual en los costes de producción indica que los efectos de reducción de costes debido a las nuevas tecnologías pueden más que su incremento debido al descenso en la calidad de los yacimientos”
- “Algunos estudios ven estacionarios a largo plazo los precios de la materias primas minerales y concluyen que la escasez no será de momento ningún problema; otros concluyen que la relación de precios con el tiempo posee una *forma de U* y, por lo tanto, la escasez estaría en aumento a largo plazo. Pero,
- **1º)** Durante el pasado siglo y en periodos de explosión del consumo, no ha existido nunca problema alguno de escasez.
- **2º)** Del pasado se extrae que la tendencia en el precio de los minerales no es fija” .....
- .....”Si la sociedad actual fuera sensible acerca de los temas de escasez mineral, invirtiendo recursos para aumentar la información geológica a fin de determinar mejor la forma de la curva de suministros acumulados, ello podría proporcionar muchos datos de las circunstancias de una posible reducción de los recursos a largo plazo”

# CONTENIDOS DE ELEMENTOS SELECCIONADOS\*

**Clarke:** es la media de la abundancia de un elemento en la corteza terrestre

## Clarke de Concentración:

la concentración de un elemento en una roca comparada con la media de la concentración en la corteza terrestre.

La ley o el Clarke de Concentración cambia con el tiempo y se ve afectada por:

1. La disponibilidad de minerales con alta ley (por ejemplo  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{PbS}$ , etc.)
2. La dificultad y el gasto de recuperar el metal a partir de su mineral (por ejemplo del aluminio, titanio)
3. Los avances en la tecnología minera y refino.
4. Los cambios en el valor que la sociedad acepta sobre el metal, por ejemplo, oro, REE, plomo, titanio.

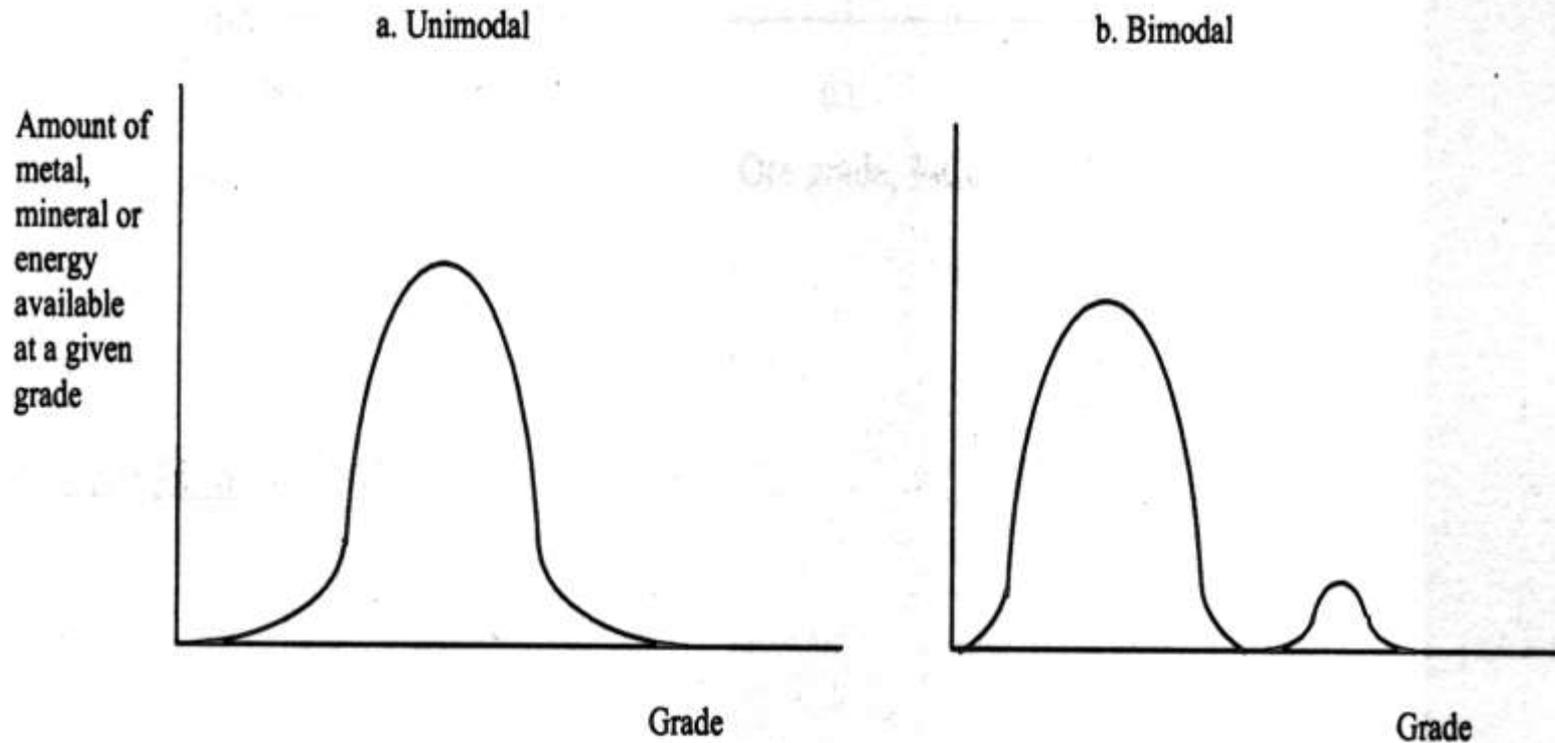
| Metal       | Clarke<br>(in percent) | Ore Grade<br>(in percent) | Clarke de<br>Concentration<br>for Ore Grade |
|-------------|------------------------|---------------------------|---|
| Aluminum    | 5.13                   | 30                        | 4   |
| Iron - Fe   | 5.00                   | 60                        | 12  |
| Titanium    | 0.66                   | 15                        | 23  |
| Copper      | 0.0055                 | 0.25                      | 45  |
| Rare Earths | 0.019                  | 1.6                       | 84  |
| Nickel      | 0.0075                 | 1.5                       | 200   |
| Gold - Au   | 0.0000005              | 0.00023                   | 460   |
| Manganese   | 0.10                   | 35                        | 350   |
| Uranium     | 0.0002                 | 0.1                       | 500   |
| Zinc        | 0.007                  | 4.0                       | 600   |
| Lead – Pb   | 0.0013                 | 4.0                       | 3000  |
| Chromium    | 0.01                   | 30                        | 3000  |
| Tin – Sn    | 0.0002                 | 1.0                       | 5000  |
| Silver – Ag | 0.00001                | 0.05                      | 5000  |

©John Berry Assoc.

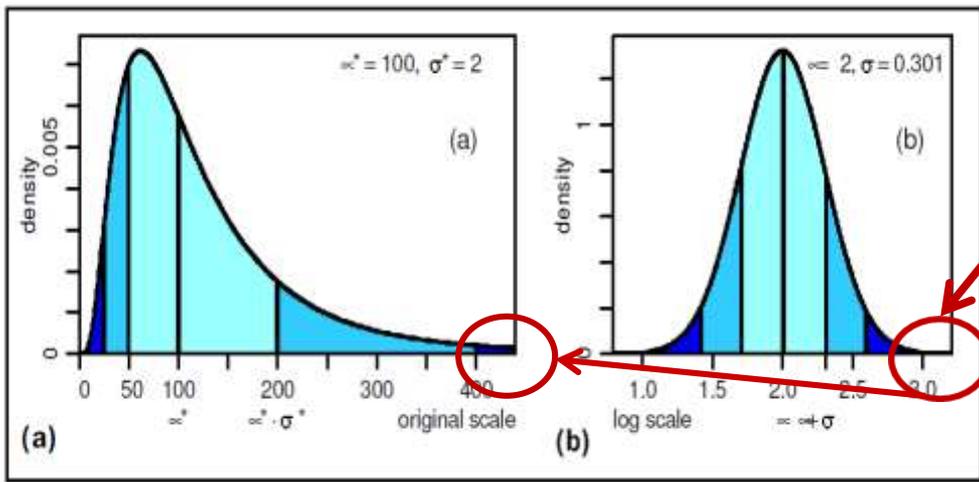
En general, cuanto mayor sea el Clarke of Concentration, menor será el yacimiento



# Factores Geológicos



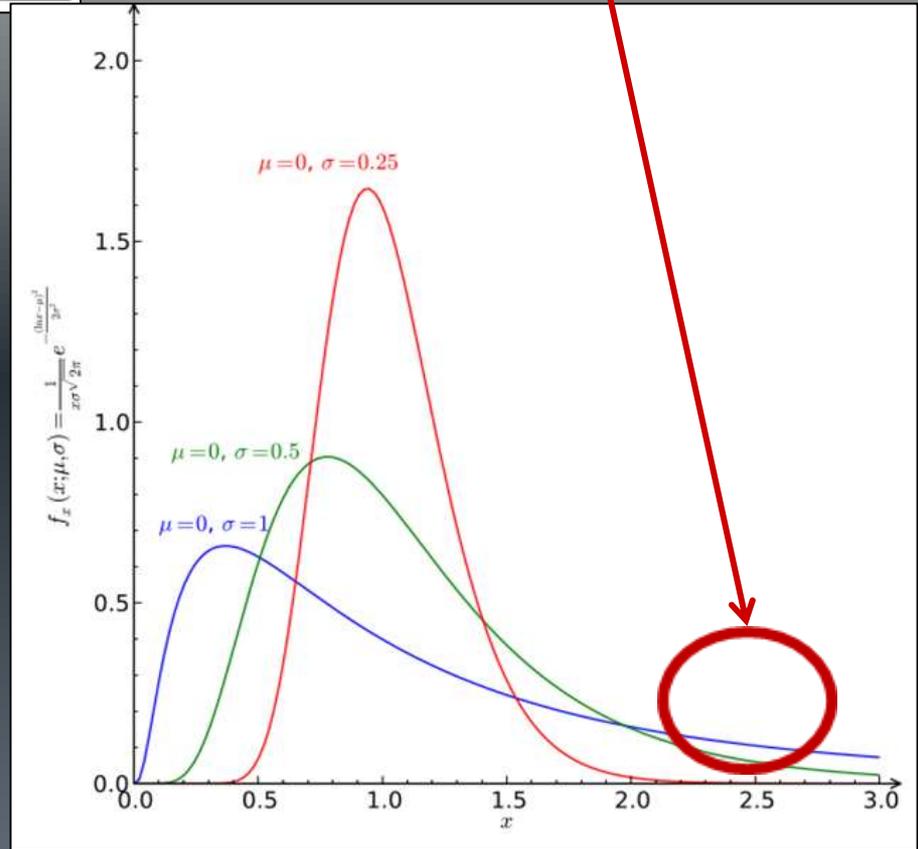
Source: Skinner (1976).



La mayoría del mineral del mundo está en un número reducido de grandes minas. Para la distribución de la izquierda, el umbral del 2,3% superior de los depósitos es 4 veces la mediana. Esto es equivalente a una distribución normal con  $X = 100, \sigma = 150$

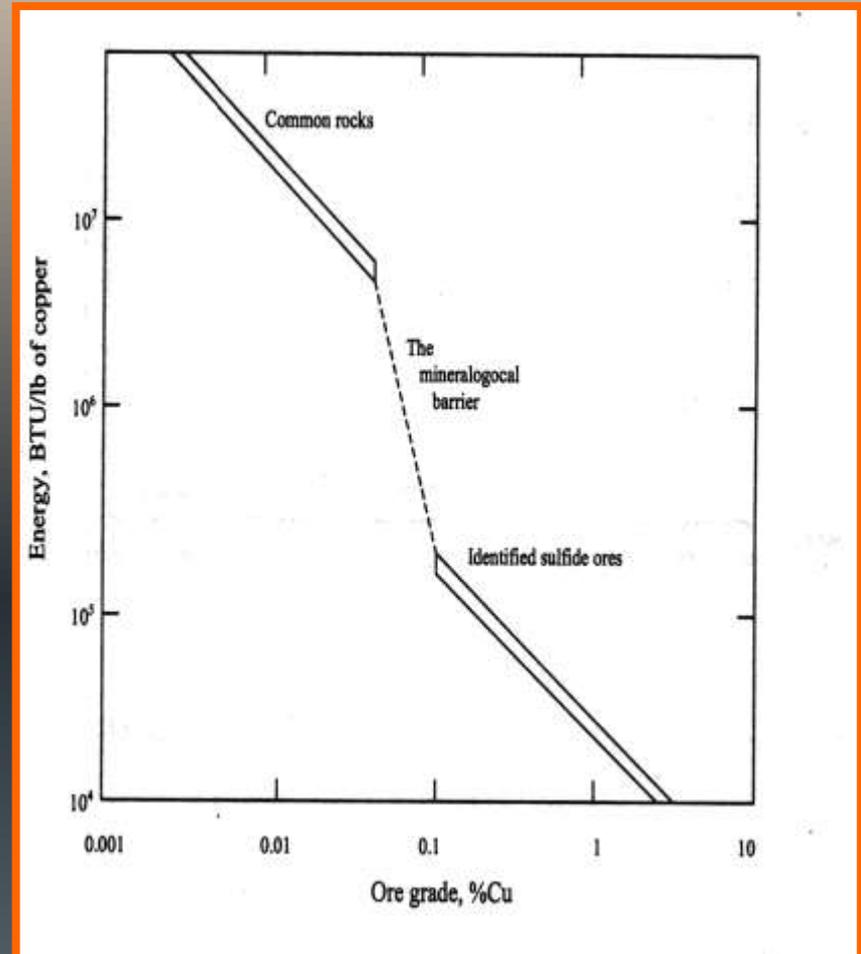
# LA DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL ©John Berry Assoc

Una distribución log-normal con escala original (a) y con logarítmica (b). Las áreas bajo la curva, a partir de la mediana a ambos lados, corresponden a uno y dos rangos de desviación estándar de la distribución normal.



# Energía y producción: “ la barrera mineralógica”

- Mientras que las barreras poseen importantes implicaciones en la disponibilidad de recursos a largo plazo, no ha recibido especial atención.
- Tampoco se ha prestado especial atención a la necesidad de utilizar otros recursos minerales en función de su nivel ambiental.



# Los futuros suministros de minerales y metales

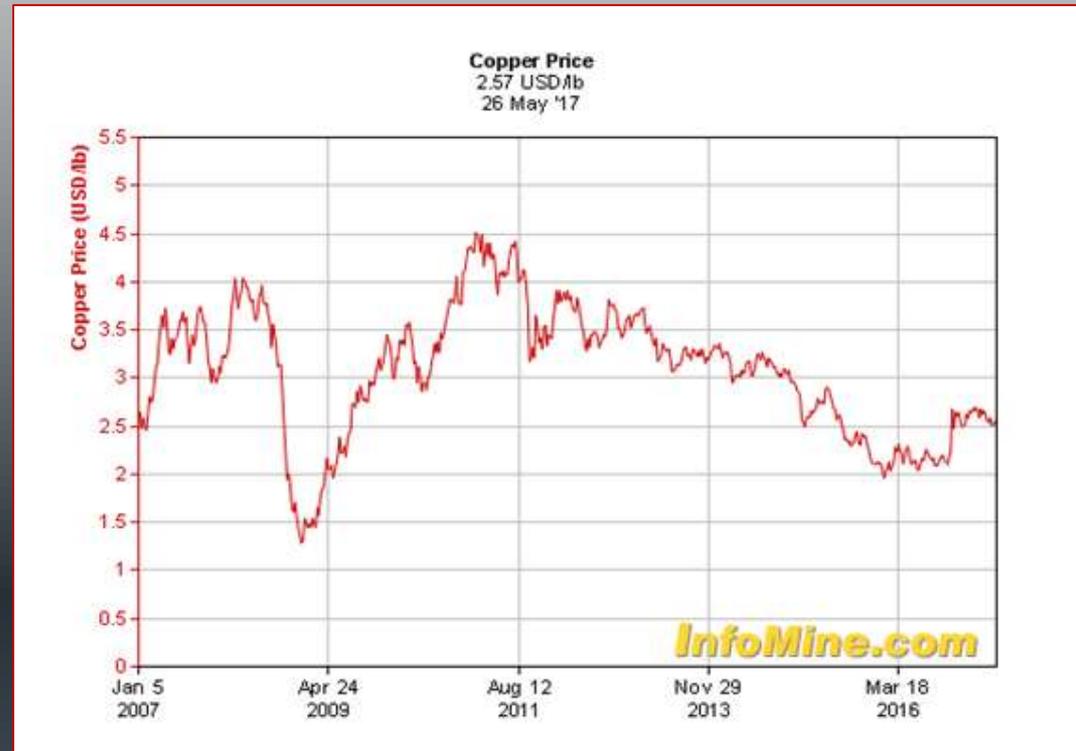
- **Según Stephen E. Kesler (2007), la población mundial está creciendo más rápidamente que en cualquier otro momento en la historia, y el consumo de minerales lo hace más rápidamente que la población, en tanto y cuanto nuevos consumidores entran en el mercado de minerales como consecuencia de su aumento en la calidad de vida.**
- ¿Significa esto que nos enfrentaremos a *una crisis de suministro* de minerales en el siglo XXI? Si es así, podemos resolver esta crisis de suministro de minerales por el aumento de la exploración de nuevos recursos minerales, y por ello se requerirá una más fiable información geológica y un más fácil acceso al territorio.
- Las respuestas a estas preguntas deben basarse en las predicciones de la demanda mundial de minerales en el siglo XXI, junto con una *mejor comprensión de la relación entre las reservas mundiales de minerales y la formación de los yacimientos.*

# La búsqueda de los metales y minerales

- En los últimos 50 años, y probablemente durante mucho más tiempo, las reservas minerales adicionales acumuladas han crecido más rápidamente que la producción.
- El comportamiento de los precios durante el siglo pasado confirma que las crecientes demandas *han sido adecuadamente satisfechas*.
- La producción histórica de minerales no ha agotado las reservas mundiales en la forma en que los depósitos individuales de mineral se agotan. Sin embargo, ha cambiado la forma y la naturaleza de la población mundial.
- En esencia, los minerales son todos los materiales o elementos que componen la tierra. A largo plazo, por lo tanto, su oferta está dictada por la composición de la corteza terrestre.
- Mining Magazine 2010

# Mickey Fulp's Call on Copper. • May 30, 2017

- El precio del cobre llegó a su máximo después de la crisis de 2009, cuando China se volvió hacia el desarrollo de infraestructura para salir de su burbuja económica.
- El cobre continuó en ese nivel hasta 2013 y luego comenzó a caer hasta que las materias primas tocaron fondo en enero de 2016.
- El cobre se recuperó más tarde en la segunda parte de 2016, cuando el recientemente electo presidente estadounidense **Donald Trump** prometió gastar 1 billón de dólares (españoles) en infraestructuras.



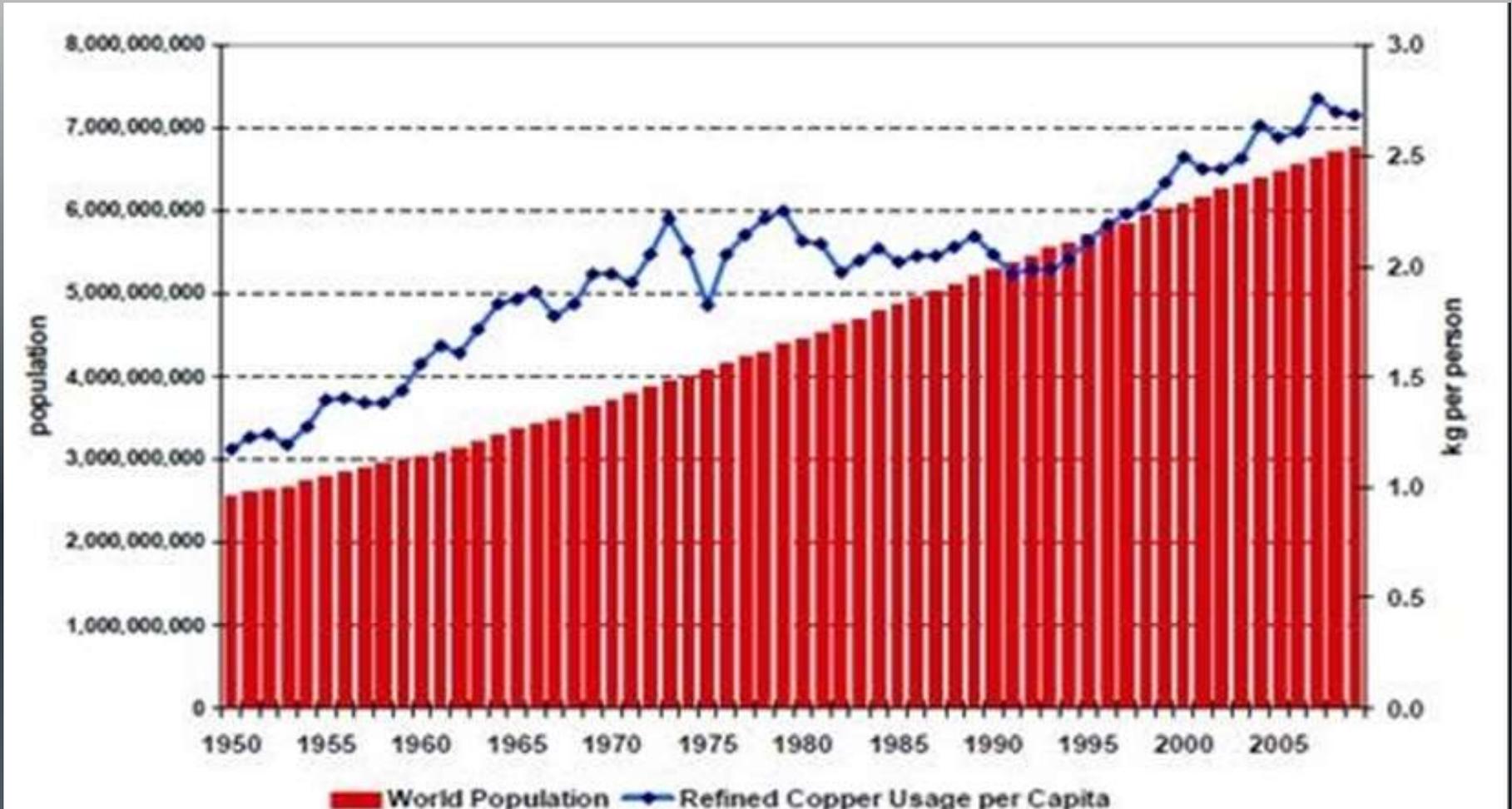
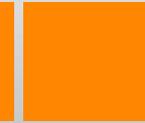
# Mickey Fulp's Call on Copper

- El mercado se ha desequilibrado desde 2007 por un pequeño déficit causado por las interrupciones del suministro.
- La demanda de cobre ha crecido un 3,4 por ciento cada año desde que el mundo se electrificó en 1990.
- "Utilizábamos 4 millones de toneladas de cobre por año en 1960 y ahora estamos usando 23 millones de toneladas de cobre al año, y esto sigue creciendo".
- Según Fulp, la demanda de cobre seguirá aumentando. Eso se debe a que la población mundial continúa aumentando, al igual que el consumo de cobre por persona. "No sólo la población mundial está aumentando en el planeta, sino que el consumo de cobre [ha estado] aumentando anualmente desde 1990, basado en la demanda de personas que no tienen electricidad".

# La opinión de Fulp

- La demanda de cobre aumentará en mercados emergentes como China, India, Brasil e Indonesia, así como en Estados Unidos.
- A medida que crezca la demanda, el déficit de oferta seguirá aumentando. "No hay una solución fácil para el problema de suministro de cobre" según Fulp, es difícil pensar de dónde vendrá el metal rojo. África tiene grandes fuentes de cobre, pero también tiene muchos países políticamente inestables.
- La clave, según Fulp, es ser más efectivo en la exploración, ya que "la tecnología y la innovación ayudarán a resolver el problema del suministro de cobre".
- "Soy optimista en el precio del cobre porque hay 85 millones de personas nuevas en el planeta cada año y el promedio de consumo de cobre es de aproximadamente 3 kilogramos cada uno"

# International Copper Study Group



# CONCLUSIONES

- La evolución futura de los suministros se torna cada vez más compleja y los modelos de evolución son más escasos y de fiabilidad muy limitada.
- Existe una enorme convergencia a nivel experto sobre la necesidad de un conocimiento geológico global suficiente para proceder a la elaboración de modelos sobre oferta y demanda de todos los metales, y más aún, en el caso del cobre.

**GRACIAS POR SU ATENCIÓN**

*Multi pertransibunt & augebitur scientia.*

